



钢纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能与损伤机制

熊艳碧 刘晓辉 程海勇 吴顺川 张京 刘伟铎 度儒军 刘泽民

Mechanical properties and damage mechanism of steel fiber reinforced cemented tailings backfill

XIONG Yanbi, LIU Xiaohui, CHENG Haiyong, WU Shunchuan, ZHANG Jing, LIU Weihua, TUO Rujun, LIU Zemin

引用本文:

熊艳碧, 刘晓辉, 程海勇, 吴顺川, 张京, 刘伟铎, 度儒军, 刘泽民. 钢纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能与损伤机制[J]. *北大: 工程科学学报*, 2025, 47(2): 234–248. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.08.004

XIONG Yanbi, LIU Xiaohui, CHENG Haiyong, WU Shunchuan, ZHANG Jing, LIU Weihua, TUO Rujun, LIU Zemin. Mechanical properties and damage mechanism of steel fiber reinforced cemented tailings backfill[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 234–248. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.08.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.08.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性

Strength and deformation properties of polypropylene fiber–reinforced cemented tailings backfill
工程科学学报. 2019, 41(12): 1618 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.12.14.002>

钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究

Experimental study on dynamic mechanical properties and damage law of steel fiber concrete
工程科学学报. 2024, 46(12): 2181 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.003>

分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律

Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill
工程科学学报. 2020, 42(10): 1286 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.12.29.003>

分级细尾砂胶结充填体早期水化放热及强度演化特性

Early hydration heat release and strength evolution of cemented backfill with graded fine tailings
工程科学学报. 2023, 45(8): 1293 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.07.24.002>

冻融循环对全尾砂固结体力学性能影响及无损检测研究

Mechanical properties and nondestructive testing of cemented mass of unclassified tailings under freeze–thaw cycles
工程科学学报. 2019, 41(11): 1433 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.23.002>

苧麻纤维增强聚乳酸复合材料性能研究

Effect of fiber content on the properties of ramie fiber reinforced poly (lactic acid) composites
工程科学学报. 2021, 43(7): 952 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.03.02.002>

钢纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能与损伤机制

熊艳碧¹⁾, 刘晓辉²⁾, 程海勇^{1,3)✉}, 吴顺川^{1,3)}, 张京¹⁾, 刘伟铎³⁾, 度儒军³⁾, 刘泽民³⁾

1) 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 昆明 650093 2) 华北科技学院安全工程学院, 廊坊 065201 3) 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

✉通信作者, E-mail: haiker2007@163.com

摘要 为探究钢纤维(SF)对充填体的力学性能与损伤破坏机制的影响,以纤维增强尾砂胶结充填体(FR-CTB)为研究对象,研究SF掺量对充填体力学性能的影响,采用数字图像相关(DIC)技术监测试件的全场应变,跟踪试件的裂纹发展,此外,从微观层面进一步研究了SF对充填体的增强机理.结果表明,随着SF掺量和养护龄期的增加,FR-CTB的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度以及抗剪强度均表现出了不同程度的增长,SF掺量为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时增强效果最好,但是当超过 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 后增强效果显著降低.钢纤维的存在较大程度上约束了充填体裂隙的扩展,削弱裂隙尖端应力集中,有效阻止了裂纹的扩展,改善整个试件的变形.此外,添加钢纤维后,尾砂颗粒、纤维和水化产物形成了一个完整且更致密的结构,在加载过程中由于SF与尾砂-水泥基体之间的相互作用,SF的增强作用主要体现在桥接和拔出行为,水化产物的存在增加了SF表面的粗糙度,从而增加了SF与水泥-尾砂基体之间的摩擦力来吸收外部载荷的能量,提高FR-CTB的力学性能.最后利用SPSS曲线估计建立各龄期充填体强度计算模型,模型精度较高,可对掺钢纤维充填体强度进行预测.

关键词 尾砂胶结充填体; 钢纤维; 力学性能; 损伤演化; 微观特征

分类号 TD853

Mechanical properties and damage mechanism of steel fiber reinforced cemented tailings backfill

XIONG Yanbi¹⁾, LIU Xiaohui²⁾, CHENG Haiyong^{1,3)✉}, WU Shunchuan^{1,3)}, ZHANG Jing¹⁾, LIU Weihua³⁾, TUO Rujun³⁾, LIU Zemin³⁾

1) Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2) School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China

3) Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

✉Corresponding author, E-mail: haiker2007@163.com

ABSTRACT To explore the influence of steel fibers (SFs) on the mechanical properties and damage/failure mechanisms of backfill, fiber-reinforced cemented tailings backfill (FR-CTB) is taken as the research subject to investigate the impact of SF content on the backfill mechanical properties. Digital image correlation (DIC) technology is employed to monitor the full-field strain of specimens and track crack development. Additionally, the microscopic strengthening mechanism of SF on backfill is studied. The results indicate that with increasing SF content and curing age, the uniaxial compressive strength, splitting tensile strength, and shear strength of FR-CTB increase to varying extents. The optimal strengthening effect occurs at an SF content of $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, but this effect diminishes notably when SF content exceeds $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. The presence of SFs significantly restrains crack expansion in the backfill, reduces stress concentration at crack tips, effectively prevents crack propagation, and improves overall specimen deformation. Compared with nonfiber-reinforced backfill, steel fiber-reinforced backfill exhibits characteristics of resisting microcracks without fracturing. DIC

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074121, 52074137); 云南省重点研发项目(202403AA080001); 云南省面上基金资助项目(202201AT070151)

damage evolution images captured at various loading stages illustrate the initiation, propagation, and penetration of cracks in backfill specimens during different failure processes. Furthermore, from a microstructural perspective, the addition of SFs results in a more complete and denser structure where tailings particles, fibers, and hydration products such as hydrated calcium silicate (C-S-H) gel, flocculent ettringite (Aft), and large calcium hydroxide (CH) crystals interact. During loading, the strengthening effect of SFs is mainly manifested through bridging and pull-out mechanisms within the tail-cement matrix. The presence of hydration products increases the roughness of the SF surface, thereby enhancing friction between SF and the cement-tailings matrix. This improves the ability to absorb external loads and enhances the mechanical properties of FR-CTB. As the SF content increases, more fibers absorb fracture energy by effectively pulling out when specimens crack. Optimal mechanical properties of FR-CTB are achieved at an SF content of $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. However, exceeding this threshold ($25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) negatively impacts the cement matrix structure, increasing porosity and consequently decreasing the mechanical properties of the backfill. Finally, SPSS curve estimation is employed to establish a strength calculation model for backfill at various ages. This model exhibits high accuracy in predicting the strength of steel fiber-reinforced backfill.

KEY WORDS cemented tailings backfill; steel fiber; mechanical properties; damage evolution; microscopic characteristics

充填体在维持采空区安全稳定、防止地表构筑物塌陷等方面发挥着不可替代的作用^[1-2], 在深部下向分层充填采矿设计中, 充填体单轴抗压强度可达到 $4 \sim 5 \text{ MPa}$ 。但工程实践发现, 单轴抗压强度并不能完全表征充填体强度性能, 充填体的剪切损伤造成的失稳破坏较为突出。如何控制充填成本, 有效改善充填体综合强度, 提高充填体力学承载性能是矿山充填面临的重要挑战。本研究着力探索纤维增强充填体力学性能, 以期在充填体综合强度方面形成新的认识。

国内外学者针对纤维增强水泥基材料的力学性能开展了大量卓有成效的研究, 过去的研究成果表明, 混凝土的性能受到多种因素的影响, 例如纤维的类型和含量^[3]、纤维形状和长度^[4]、纤维分布^[5-6]等。钢纤维材料可以提高混凝土的力学性能、延性、耐久性和冻融性能^[7-9], 在废旧轮胎中提取的回收钢纤维大量用于增强水泥基复合材料的力学性能, 是高成本工业钢纤维的最佳替代品, 具有较低的环境影响和回收成本^[10], 相关研究表明^[11], 纤维能够有效控制混凝土裂缝的发展, 提高混凝土的整体稳定性。由于充填体的颗粒更细且颗粒分布范围更广、水泥含量较低, 尾矿中的化学成分更复杂, 使得充填体与混凝土具有显著的力学差异^[12]。目前, 在矿山充填领域, 基于纤维增强尾砂胶结充填体的研究主要集中于低弹性模量的纤维(比如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和玻璃纤维等)的种类、含量和长度等对充填体性能的影响, 如 Chen 等^[13]通过宏观失效模式和扫描电镜分析表明, 聚丙烯纤维可以防止拉拔和拉断失效模式期间形成大的拉伸和剪切裂纹。Zhao 等^[14]研究了玻璃、聚丙烯腈及两者的混合纤维对早期充填体压缩韧性和损伤的影响, 发现三种纤维抑制了充

填体的裂纹扩展速率, 损伤过程中均提高了充填体的耐久性。杨晓炳等^[15]通过试验研究发现, 在单轴加载条件下不同长度聚丙烯纤维的掺入提高了充填体的抗变形破坏的能力且能够有效抑制充填体的损伤破坏。尹升华等^[16]研究发现, 添加玻璃纤维不仅能够显著提高充填体的抗压强度, 而且能够抑制充填体的强度劣化。从上述研究结果可以看出, 纤维在有效提高充填体的力学性能, 荷载作用下纤维对抑制裂纹的扩展方面具有巨大的应用潜力, 但目前纤维的应用研究多针对混凝土的强度和流动性, 对于低水泥掺量、超细粒径充填体强度的研究缺乏从宏观-细观-微观角度评估纤维增强充填体的裂隙演化分析。因此, 采用多种非常规手段对尾砂胶结充填体的纤维增强效应开展针对性研究, 是纤维增强充填体理论与技术发展的重要支撑。

DIC 作为一种非接触式、全视场、高精度的光学技术, 通过对比分析加载前后表面随机分布的散斑特性, 可得到整个试样的变形情况^[17-18], 在岩石、水泥基材料的裂纹扩展研究中得到了广泛应用^[19-21]。李占金等^[22]利用 DIC 技术监测单轴压缩下的未含充填体裂隙岩石、含充填体裂隙岩石的表面应变场特征以及裂纹扩展演化路径。Mo 等^[23]对混凝土立方体试件进行轴压试验, 采用 DIC 技术监测试件的全场应变, 跟踪试件的裂缝发展, DIC 技术测得的应力-应变曲线形状与试验基本一致。Zhao 等^[24]利用 DIC 技术分析了不同尺寸充填体的破裂过程, 发现在单轴压缩荷载作用下, 小试件表面裂纹演化迅速且剧烈, 无明显脱落区域, 而大试件表面裂纹表现为塑性破坏。综上所述, DIC 技术是研究水泥基材料破坏过程断裂特性的一种行之有效的测量方法。

本研究通过室内力学试验、DIC 全场应变监测、

扫描电子显微镜 (SEM) 等手段, 开展钢纤维增强充填体力学性能与损伤机制研究, 从强度规律、应力应变、裂纹发展、损伤特性及内部微观结构特征等方面探讨钢纤维增强充填体的强度演化机理, 最后建立纤维增强充填体强度计算模型, 在充填体强度研究方面具有重要的理论意义与工程价值.

1 试验设计及方法

1.1 试验材料

全尾砂、水泥、水和钢纤维是本试验研究的原材料. 本试验所用全尾砂材料取自大红山铜矿, 采用 Mastersizer 3000 型激光粒度仪测定尾砂的粒径分布, 得到尾砂的粒径分布及堆积曲线如图 1 所示, 分析图 1 得到尾砂的 $d_{10}=6.05 \mu\text{m}$ 、 $d_{30}=21.7 \mu\text{m}$ 、 $d_{60}=63.9 \mu\text{m}$, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别表示粒径小于 6.05、21.7、63.9 μm 的尾砂颗粒累计达 10%、30%、60%, 计算得到不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=10.562$, 曲率系数 $C_c=d_{30}^2/(d_{10}\times d_{60})=1.218$, 尾砂级配良好, 且密实程度

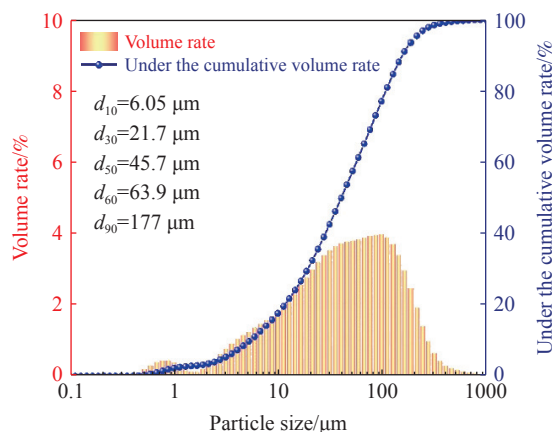


图 1 全尾砂粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of total tailings

较高. 对尾砂进行 X 射线荧光光谱 (XRF) 化学分析, 结果如表 1 所示. 试验所用胶凝材料为 P·O42.5 普通硅酸盐水泥, 选用镀铜平直钢纤维为纤维增强材料, 形态如图 2 所示, 钢纤维的物理参数见表 2. 试验用水为实验室自来水.

表 1 全尾砂的化学组分 (质量分数)

Table 1 Chemical component of total tailings

| CaO | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | MgO | Na ₂ O | Others |
|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|--------|
| 59.09 | 10.84 | 10.59 | 3.43 | 1.18 | 1.14 | 0.43 | 1.5 |

1.2 试件制作

根据前期探索性试验, 在合理的强度与流动性要求基础上, 设定充填体料浆固相质量分数 75%, 灰砂比 1 : 10, SF 掺量为 0、10、15、20 和 25 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 配比方案见表 3. 为防止纤维聚集分布, 同时排除搅拌设备、搅拌时间等因素对充填体料浆质量的影响, 采用先干拌后湿拌法, 将尾砂、水泥、纤维在干燥状态下拌合均匀 3 min, 再加入水搅拌通过搅拌机拌合 5 min 直至搅拌均匀^[25-26], 将搅拌均匀的料浆均匀倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的三联立方体模具和直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱体



图 2 钢纤维形态

Fig.2 Steel fiber form

模具中, 室内放置 24 h 后, 将制作好的充填体试件脱模, 并分组编号, 恒温恒湿养护, 设置相对湿度为 $95\pm 2\%$ 、温度为 $20\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.3 试验方法

充填料浆流动性的测试根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016) 开展, 将制备好的浆料倒入高为 300 mm, 顶部直径为 100 mm, 底部直径为 200 mm 的锥形坍落度桶中以测试其坍落度和扩展度. 将到达养护龄期的试件采用全自动压力机 (YABJ-300) 分别进行单轴抗压强度、劈裂抗拉强度以及变角剪切实验, 为减少测试误差, 每组配比取 3 个样品独立测试, 相对于平均强度的最大误差为 15% 以内时, 测量结果取三个试件的算术平均值作为该组试件的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度. 具体试验流程及主要装置如图 3 所示.

为实时测量钢纤维增强充填体试件在加载状态的变形特征, 在试样表面制作散斑, 开展 DIC 全场应变监测实验, 运用 MatchID Stereo 软件对加载前后试样表面的散斑进行分析.

为分析充填体损伤微观形态, 开展 SEM 微观扫描实验. 取部分破坏后的试件样品, 用无水乙醇

表2 钢纤维的物理参数

Table 2 Physical parameters of steel fiber

| Fiber type | Length, l_f /mm | Diameter, d_c /mm | l_f/d_c | Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | Tensile strength/MPa |
|------------------|-------------------|---------------------|-----------|---|----------------------|
| Steel fiber (SF) | 13 | 0.2 | 65 | 7.9 | 2500 |

表3 试验配比方案

Table 3 Test proportioning scheme

| Serial No. | Mass fraction/% | Cement sand mass ratio | SF content/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|------------|-----------------|------------------------|--|
| 1 | 75 | 1 : 10 | 0 |
| 2 | 75 | 1 : 10 | 10 |
| 3 | 75 | 1 : 10 | 15 |
| 4 | 75 | 1 : 10 | 20 |
| 5 | 75 | 1 : 10 | 25 |

终止水泥水化反应, 并将样品干燥 24 h, 为获得更好的导电性, 试验前先对样品进行镀金处理, 采用 SEM(SU3900) 观察样品的微观形貌。

2 试验结果及分析

2.1 充填体强度规律分析

(1) 钢纤维掺量对充填料浆流动性影响分析.

由图 4 可知, 钢纤维掺量从 0 增加至 $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

的变化过程中, 充填料浆的坍落度值从 271 mm 降低至 255 mm, 降低幅度为 5.9%, 扩展度值从 659 mm 降低至 611 mm, 降低幅度为 7.2%, 料浆坍落度和扩展度均呈下降的趋势, 表明钢纤维的加入会对充填料浆的流动性产生不利影响。

(2) 纤维含量对充填体单轴抗压强度的影响分析.

不同养护龄期下充填体的单轴抗压强度 (UCS) 与 SF 掺量关系如图 5 所示, UCS 增长率 G_u 计算公式为:

$$G_u = \frac{\text{UCS}_{\text{fiber}} - \text{UCS}_{\text{ctb}}}{\text{UCS}_{\text{ctb}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\text{UCS}_{\text{fiber}}$ 为钢纤维增强充填体的单轴抗压强度, MPa; UCS_{ctb} 为非纤维增强充填体的单轴抗压强度, MPa。

从图 5 中可以看出, UCS 呈现出早期 (3 d ~ 7 d) 快速增长、后期 (7 d ~ 28 d) 缓慢增长的规律, 在特

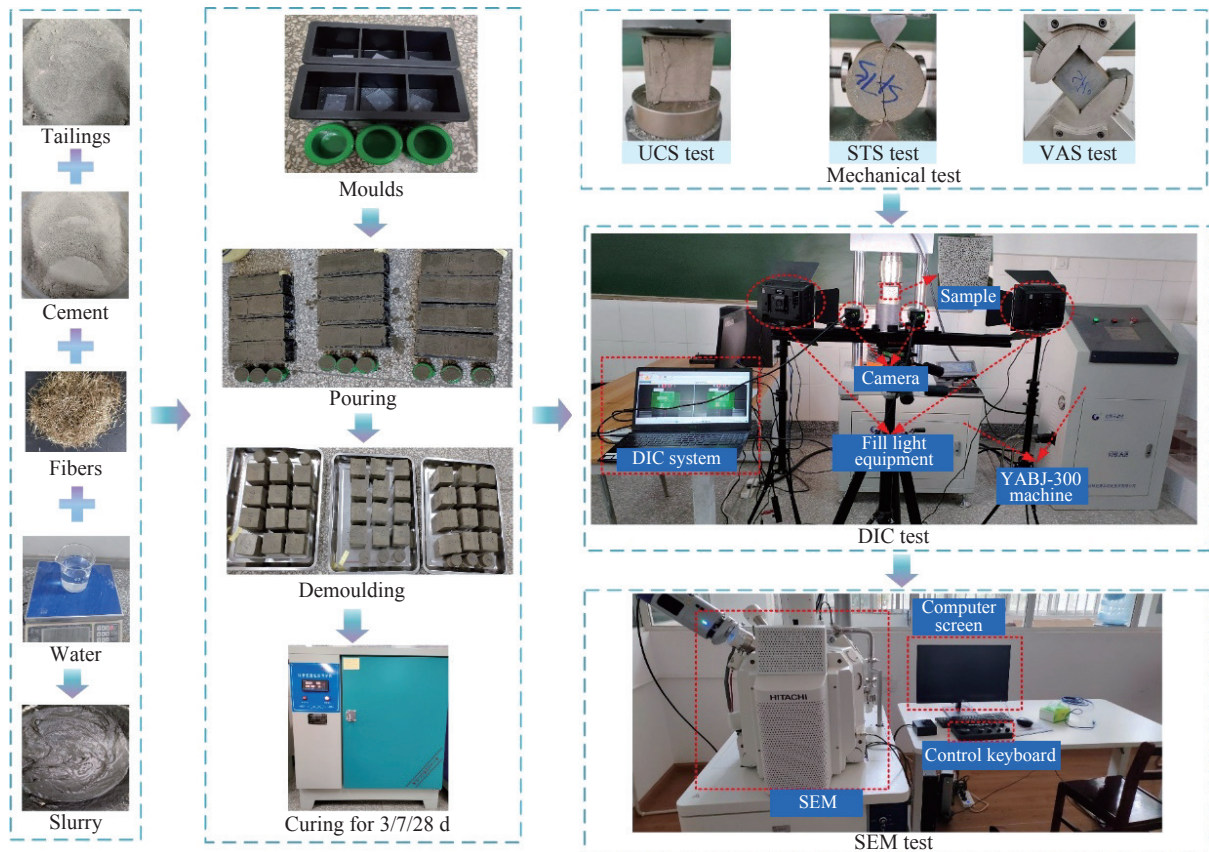


图3 试验流程示意图

Fig.3 Schematic of the test process

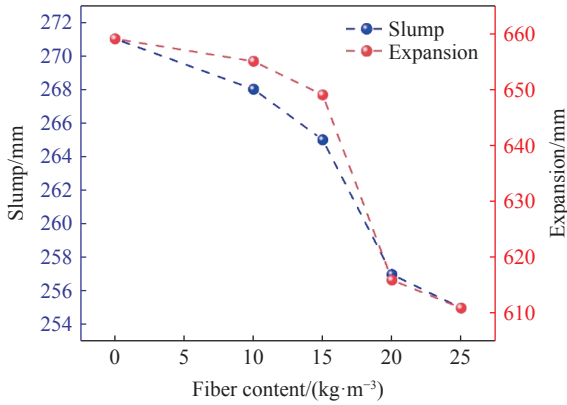


图 4 图料浆坍落度、扩展度与纤维掺量的关系

Fig.4 Relationship between slump and expansion of slurry and SF content

定的养护龄期下,随着 SF 掺量的增加,UCS 呈先上升后下降的趋势,在 SF 掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时达到最大值,说明纤维掺量存在临界值. SF 掺量的增加对早期 UCS 没有明显的增强作用,养护龄期为 28 d 时,UCS 增长率在 9.12% ~ 27.62% 之间, SF 掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时 UCS 达到最大值 1.856 MPa,此时的 UCS 增长率也达到了最大值 27.62%, 增强效果最佳,当

纤维掺量超过临界水平 ($20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 时,纤维对充填体的强度增强效果显著降低,但其强度仍高于非纤维增强充填体,因此, SF 的加入可以有效提高充填体的后期 UCS.

(3) 纤维含量对充填体劈裂抗拉强度的影响分析

不同养护龄期下充填体的劈裂抗拉强度 (STS) 与 SF 掺量关系如图 6 所示, STS 增长率 G_s 计算公式为:

$$G_s = \frac{\text{STS}_{\text{fiber}} - \text{STS}_{\text{ctb}}}{\text{STS}_{\text{ctb}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\text{STS}_{\text{fiber}}$ 为钢纤维增强充填体的劈裂抗拉强度, MPa; STS_{ctb} 为非纤维增强充填体的劈裂抗拉强度, MPa.

从图 6 中可以看出,在特定的养护龄期下,随着 SF 的增加, STS 及其增长率先增大后减小,在 SF 掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时达到最大,增强效果最好,且在 7 d、28 d 时 STS 的增长率均超过 20%, 最高可达 38.22%, 但当超过 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, STS 都有不同程度的下降, 但均高于非纤维增强充填体, 表明 SF

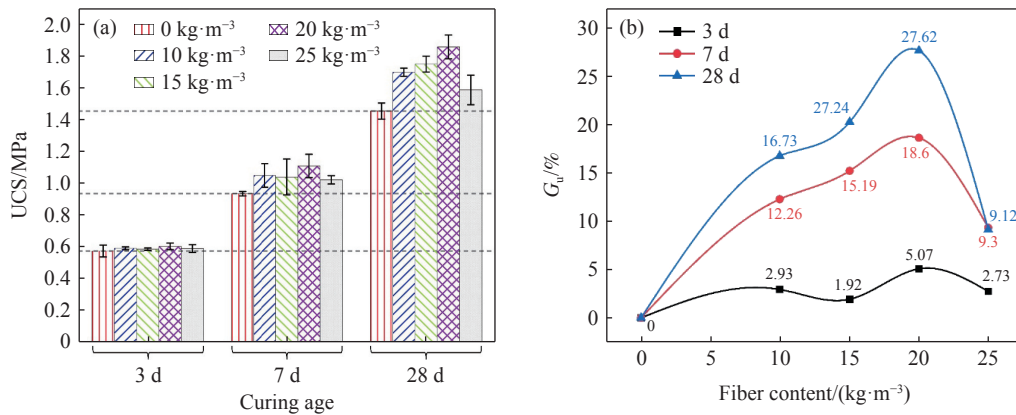


图 5 不同养护龄期下 UCS 与纤维掺量的关系. (a) UCS; (b) UCS 增长率

Fig.5 Relationship between UCS and fiber content in different curing ages: (a) UCS; (b) UCS growth rate

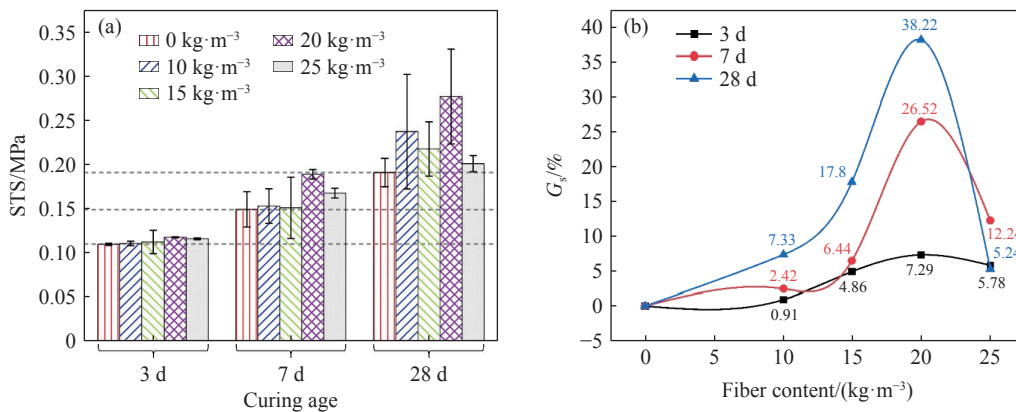


图 6 不同养护龄期下 STS 与纤维掺量的关系. (a) STS; (b) STS 增长率

Fig.6 Relationship between STS and fiber content at different curing ages: (a) STS; (b) STS growth rate

可以有效提高充填体的 STS, 特别是后期 STS.

(4) 纤维含量对充填体抗剪强度的影响分析

不同养护龄期下的充填体抗剪强度与 SF 掺量关系如图 7 所示. 由于剪切力占比随着剪切角的增大而增大, 正应力占比随着剪切角的增大而减小, 导致在较大的剪切角下更容易发生剪切破坏^[27]. 由图 7 可知, 对于特定的纤维掺量, 抗剪强度随着剪切角的增加而降低, 尤其是剪切角度从 45°增大到 55°时, 抗剪强度显著下降; 在特定的养护龄期下, 随着纤维的增加, 充填体的抗剪强度整体上呈先增后减的趋势, 且在 SF 掺量为 20 kg·m⁻³ 时达到最大; 在特定的剪切角度下, 充填体抗剪强度在养护早期 (3 d ~ 7 d) 的抗剪强度变化不显著, 在养护后期 (7 d ~ 28 d) 抗剪强度得到大幅度的提高, 显著高于早期抗剪强度.

将变角剪切试验测得的数据进行处理分析, 以剪应力作为纵坐标, 正应力作为横坐标进行线性拟合, 绘制出正应力、剪应力与不同 SF 掺量之间的线性回归关系图, 得到直线斜率的反向正切角即为充填体内摩擦角 φ 值, 而直线与纵坐标的截距即为充填体的黏聚力 c 值^[28]. 试验数据计算结果

如表 4 所示. 由表 4 可知, 充填体试件的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与养护龄期和 SF 掺量密切相关, 总体来看, 在特定的养护龄期下, 随着 SF 掺量的增加, 黏聚力 c 值整体上呈先增加再减小的趋势, 而内摩擦角 φ 则呈先减小后增大的趋势, 20 kg·m⁻³ 的 SF 为临界值; 在特定的 SF 掺量下, 随着养护龄期的增加, 充填体试件的黏聚力 c 随着增大, 而内摩擦角 φ 随着减小, 在养护后期, c 、 φ 的增长率与早期相比显著减小.

综合 SF 对充填体的 UCS、STS、抗剪强度影响规律分析, 当 SF 掺量为 20 kg·m⁻³ 时, 充填体具有最优的力学性能, 超过临界水平 (20 kg·m⁻³) 则会对充填体的力学性能的改善效果显著降低, 但仍优于非纤维增强充填体.

2.2 充填体表面损伤演化分析

SF 不仅影响充填体试件的力学性能, 同时也影响其应力应变行为, DIC 全场应变监测结合同步运行的试验加载仪器, 获取加载中各阶段应变云图和应力应变曲线, DIC 软件图像分析后得到的应变场云图更准确地反映了充填体在加载过程中的应力集中和裂纹演化过程^[24]. 单轴压缩下养

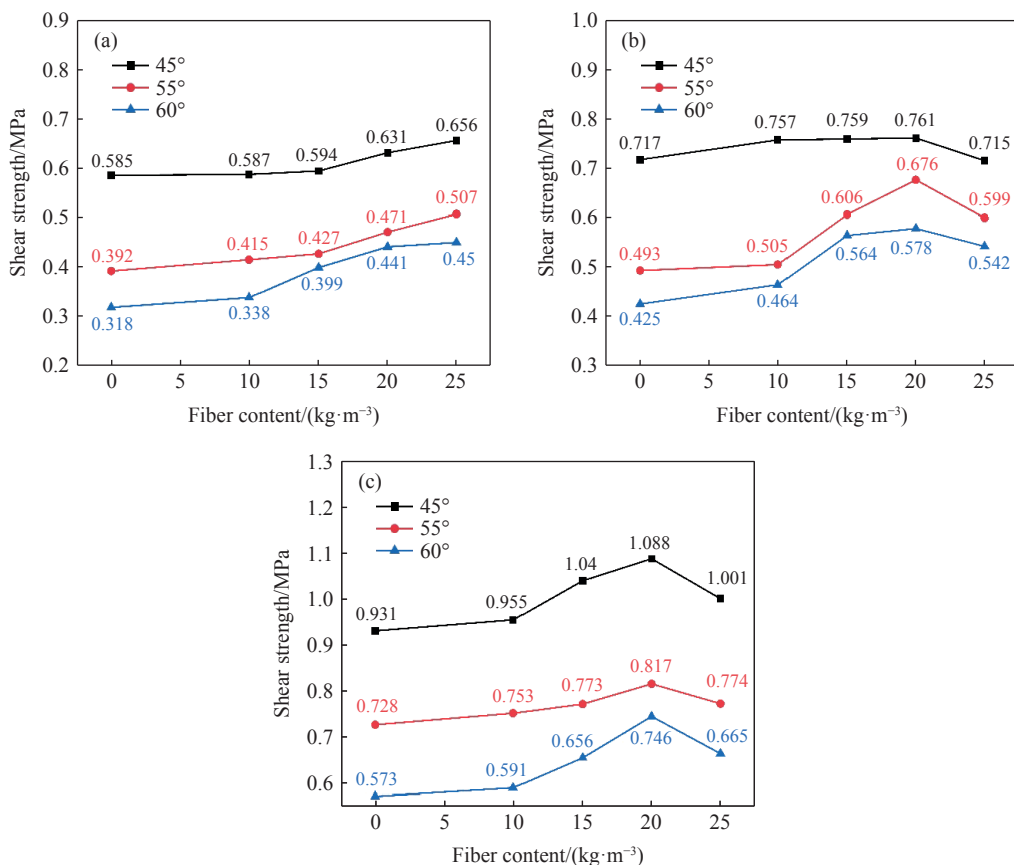


图 7 不同剪切角下充填体抗剪强度与 SF 掺量关系. (a) 3 d; (b) 7 d; (c) 28 d

Fig.7 Relationship between shear strength of backfill and SF content at different shear angles: (a) 3 d; (b) 7 d; (c) 28 d

表 4 c 、 φ 值计算结果

Table 4 Calculation result of c and φ

| Curing age | SF content/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | c / MPa | Growth rate of c /% | φ / ($^{\circ}$) | Growth rate of φ /% |
|------------|--|--------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 3 d | 0 | 0.204 | 0 | 32.82 | 0 |
| | 10 | 0.223 | 9.31 | 31.57 | -3.81 |
| | 15 | 0.268 | 31.37 | 28.30 | -13.77 |
| | 20 | 0.306 | 50.00 | 26.78 | -18.40 |
| | 25 | 0.320 | 56.86 | 26.87 | -18.13 |
| 7 d | 0 | 0.276 | 0 | 31.23 | 0 |
| | 10 | 0.296 | 7.25 | 30.87 | -1.15 |
| | 15 | 0.415 | 50.36 | 24.07 | -22.93 |
| | 20 | 0.458 | 65.94 | 21.94 | -29.75 |
| | 25 | 0.414 | 50.00 | 22.62 | -27.57 |
| 28 d | 0 | 0.404 | 0 | 29.55 | 0 |
| | 10 | 0.420 | 3.96 | 29.37 | -0.61 |
| | 15 | 0.449 | 11.14 | 29.35 | -0.68 |
| | 20 | 0.519 | 28.47 | 27.21 | -7.92 |
| | 25 | 0.470 | 16.34 | 27.69 | -6.29 |

护 7 d 的充填体试件应力-应变曲线及损伤演化云图如图 8 所示, 以 SF 掺量为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的充填体试件为例, 选取应力-应变曲线上的 5 个点, 与 DIC 分析图像一一对应, 其中 a、b、c 和 d 点分别代表峰值应力 (σ_{\max}) 的 25%、50%、75% 和 100%, 而 e 点代表峰值应力下降 10%, 对应 $25\%\sigma_{\max}$ 、 $50\%\sigma_{\max}$ 、

$75\%\sigma_{\max}$ 、 σ_{\max} 、 $90\%\sigma_{\max}$.

由图 8 可知, 充填体试件在单轴压缩加载中的损伤演化规律如下: 孔隙裂隙压密阶段 (a 点前), 受载初期充填体内部原有的微孔隙逐渐闭合, 充填体被压密, 形成早期的非线性变形, 充填体表面应变场变化不明显, 整体为紫色和蓝色, 如 a 图所示; 弹性变形阶段 (a~c), 应力-应变曲线近似直线, 随着 SF 的增加, 曲线斜率增加, 弹性模量增加, 试件表面逐渐出现应变集中区域, 如 b 图中绿色区域所示, 呈条状展开, 试件表面形成初始裂隙, 初始裂隙形成后, 裂隙尖端产生应力集中, 由于充填体是脆性材料, 在应力集中作用下, 裂隙沿着加载方向扩展, 条状应变集中区随着试验的进行不断延伸和扩展, 逐渐形成应变集中区, 如 c 图所示; 塑性屈服阶段 (c~d), 应力-应变曲线呈上凸型, 试件的变形由弹性变形过渡到塑性变形, 并逐渐到达峰值强度 d 点, 峰值应力随纤维的增加呈先增加后减小的趋势, 并在 SF 掺量为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时达到最大, 应力集中越来越明显, 绿色和黄色区域迅速扩张, 达到峰值应力点 (d 点) 时, 充填体表面出现宏观裂纹, 对应绿色和红色应变集中区域, 如 d 图所示, 说明充填体内部的微裂缝是连续贯通的; 破坏后阶段 (d 点后), 试样到达峰值强度后, 裂纹进一步扩展, 绿色区域扩张, 此时伴有充填体表面的脱落, 其内部结构遭到破坏, 充填体内部形成

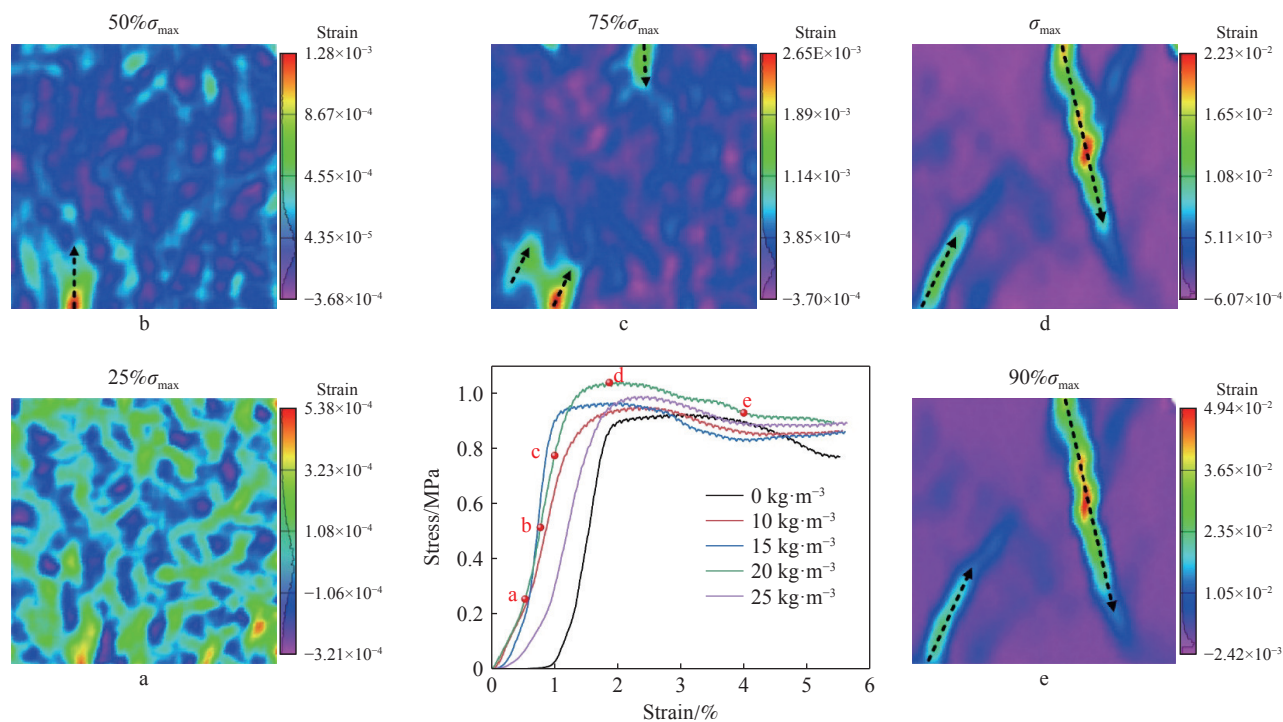


图 8 单轴压缩过程全场主应变损伤破坏云图

Fig.8 Cloud image of full-field principal strain damage during uniaxial compression

贯穿裂纹,如 e 图所示,致使钢纤维增强充填体试件结构失稳破坏,试件破坏相关的应变变化范围主要发生在峰值应力之后。

在劈抗拉强度试验下,养护 7 d 的充填体试件的应力-应变曲线及损伤演化云图如图 9 所示,以 SF 掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的充填体试件为例,应力-应变曲线上的点 a、b、c、d、e 含义同图 8。从图 9 可以看出劈裂破坏过程分为两个阶段^[29]: d 点之前为弹性变形阶段,曲线呈线性增长趋势,内部微孔隙在初始加载条件下被压实和封闭,曲线线性增加直至达到峰值拉应力(d 点),钢纤维增强充填体的裂纹扩展路径实际上与加载路径相似,并且主要表现为拉伸损伤,裂纹萌生区域是从截面直径的中心开始,充填体试样中部最先产生应变集中,随着加载的进行,裂纹逐渐向周围区域扩展,直至试件完全破坏,最终形成与加载方向一致的贯通型应变带;d 点之后为破坏阶段,应力超过 d 点,充填体试件瞬间破坏,应力值急速下降, SF 桥接裂纹并防止其扩展,从而防止过早失效并保持钢纤维增强充填体的完整性。试件破坏后,云图中红色应变带部分出现空白,这是由于裂纹变宽导致其附近的一些散斑被破坏。

图 10 为 60° 剪切角下的剪应力-剪应变曲线及损伤演化云图,以养护 7 d 的充填体试件为例,在

变角剪切试验下,充填体试件整个破坏过程应力应变曲线与单轴抗压强度试验过程类似,参考单轴压缩过程,其中 a、b、c 和 d 点分别代表峰值剪应力的 25%、50%、75% 和 100%,而 e 代表峰值剪应力(τ_{\max})下降 10%,对应 $25\%\tau_{\max}$ 、 $50\%\tau_{\max}$ 、 $75\%\tau_{\max}$ 、 τ_{\max} 、 $90\%\tau_{\max}$ 。

充填体试件变角剪应变场演化呈现出以下特征: a 点之前试件处于初始压密阶段,充填体表面变形较为均匀,整体为蓝色,如 a 图所示;随着应力的增加,试件表面应变变化不明显,应变较大的位置出现在试件与夹具的接触面,如 b 图所示;随着应力的进一步加载,与前一阶段相比,试件表面变形更加明显,出现了明显的绿色应变带,但裂纹并未延伸贯穿试件,整体上应变较大的位置出现在试件的中间界面以及试件与夹具的接触位置,如 c 图所示; c 点之后,试件的承载力迅速增加,直至达到峰值剪应力 d 点,试件经历损伤加速阶段,应变带延伸穿过剪切界面,形成明显的应变剪切区,表面裂纹穿透界面产生引起充填体试件失稳损伤的主裂纹,如 d 图所示;当进入峰后破坏阶段(d 点后),剪应力迅速下降,充填体表面的主裂纹延伸并贯通试件,并伴随一些次生裂纹,如 e 图所示,云图中红色应变带部分出现空白,这是由于裂纹变宽导致其附近的一些散斑被破坏。

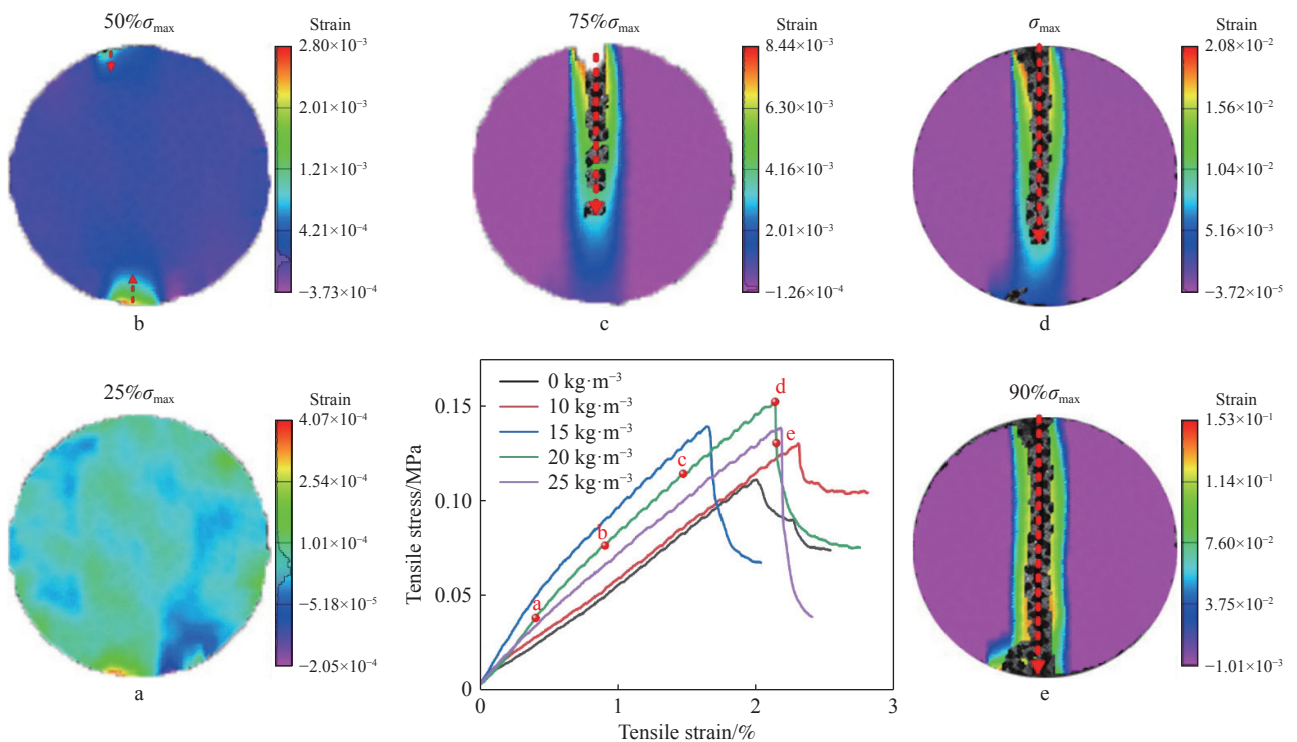


图 9 劈裂抗拉过程全场主应变损伤破坏云图

Fig.9 Cloud image of full-field principal strain damage during splitting tensile process

2.3 充填体宏观破坏形态分析

表 5 为充填体在单轴压缩试验下的破坏形态。由表 5 可知, 单轴压缩试验下, 充填体试件在不同

纤维掺量和不同养护龄期下的破坏模式不同, 非纤维增强充填体试件表面沿加载方向出现宏观主裂纹, 且局部位置出现块体剥落现象, 但随着养护

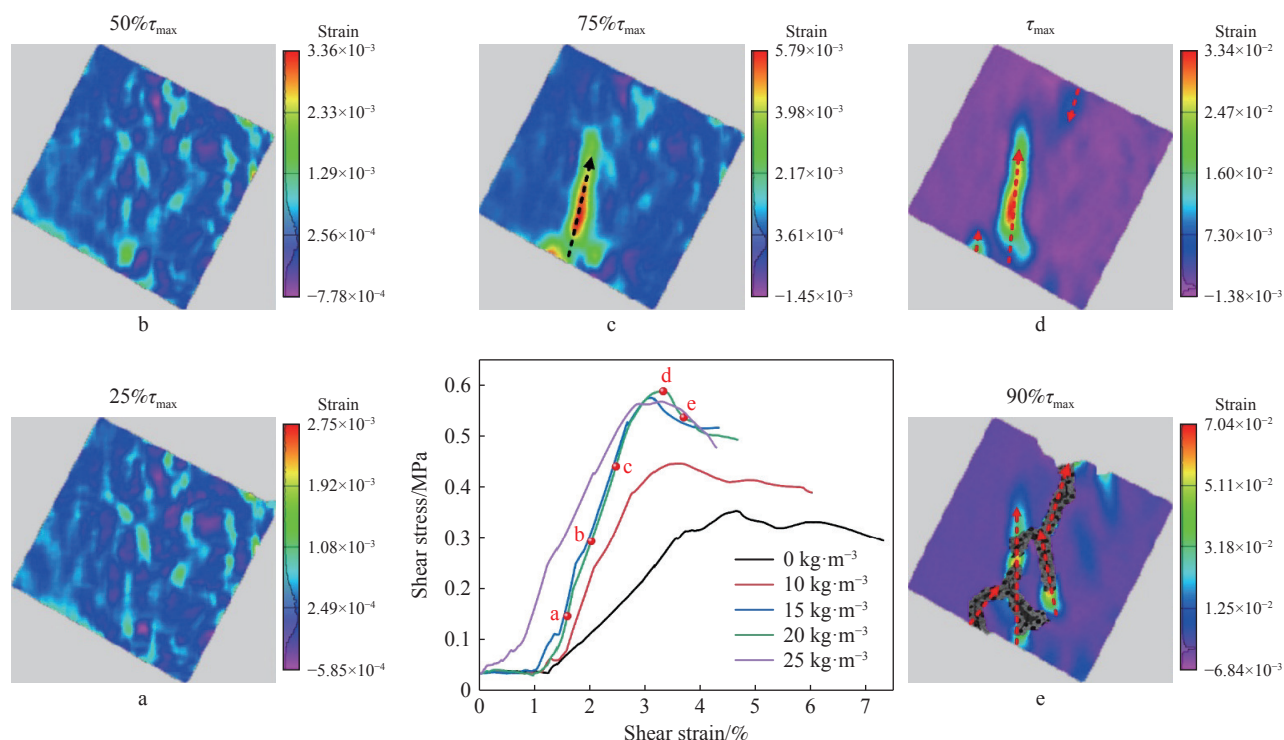


图 10 变角剪切过程全场主应变损伤破坏云图

Fig.10 Cloud image of full-field principal strain damage during angular shear

表 5 不同 SF 含量和养护龄期的充填体试件在单轴压缩试验下的破坏模式

Table 5 Failure mode of backfill specimens with different SF content and curing age under UCS test

| Curing age | Failure mode | | | | |
|------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Fiber content 0 | Fiber content 10 kg·m ⁻³ | Fiber content 15 kg·m ⁻³ | Fiber content 20 kg·m ⁻³ | Fiber content 25 kg·m ⁻³ |
| 3 d | | | | | |
| 7 d | | | | | |
| 28 d | | | | | |

时间的增加, 裂纹数量减少且块体剥落现象也得到改善. SF 掺量从 0 增加至 $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 充填体破坏形态表现出宏观裂缝逐渐减少, 试样加载端出现多个次生裂纹, 几乎不出现贯穿裂纹, 试样仍可以保持宏观稳定, 直至试验结束, 特别是在养护后期 (28 d), 外荷载作用下几乎不出现块体剥落现象, 试件整体裂而不断, 各块体之间有连接, 并保持良好的整体性. 钢纤维增强充填体承受的应变比非纤维增强充填体的大得多, 主要原因是纤维的桥接作用可以阻止充填体中裂缝的扩展, 因此与非纤维增强充填体相比, 钢纤维增强充填体表现出抵抗细观裂隙不断裂的特征.

表 6 显示了劈裂抗拉强度试验下充填体试件在不同纤维掺量和养护龄期的破坏形态, 由表 6 可知, 充填体试件在劈裂抗拉强度试验下的破坏路径基本沿着圆柱体试件中心轴线, 破坏模式与纤维含量密切相关, 非纤维增强充填体试件裂纹较宽, 发生完全脆性破坏, 并沿裂缝分成两部分, 但随着养护龄期的增加, 裂纹扩展有所改善; 在特定的养护龄期下, 随着 SF 掺量的增加, 由于桥接

裂纹的纤维量急剧增加, 主裂纹的宽度逐渐减小, 与非纤维增强充填体试件相比, 钢纤维增强充填体试件保持了相对较高的强度和完整性.

大剪切角度下由于法向应力比例较小, 试件的断裂面相对较为平整, 且前表面的开裂过程与试样内部的开裂过程更为一致, 因此, 本文以 60° 剪切角下的充填体破坏形态为例, 表 7 为充填体试件在不同纤维掺量时的破坏形态, 由表 7 可知, 在特定的养护龄期下, 充填体试件基本沿着预设的剪切面发生剪切破坏, 在非纤维增强充填体试件表面还伴随着次生裂纹, 随着 SF 掺量的增加, 次生裂纹数量逐渐减少, 主要表现出一条沿着剪切面的主裂纹; 在特定的 SF 掺量下, 随着养护龄期的增加, 剪切面附近的次生裂纹逐渐减少, 裂纹宽度和剪切位移也逐渐减小, 这说明充填体试件的抗剪强度逐渐增强.

3 纤维增强机理及强度计算模型

3.1 微观机理分析

SEM 为研究胶凝材料的微观结构提供了良好

表 6 不同 SF 含量和养护龄期的充填试件在劈裂抗拉强度试验下的破坏模式

Table 6 Failure modes of backfill specimens under STS testing, varying by SF content and curing age






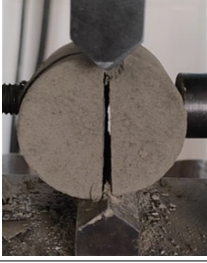





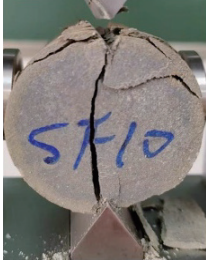

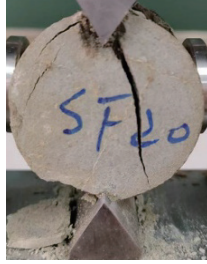
















| Curing age | Failure mode | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|
| | Fiber content 0 | Fiber content $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | Fiber content $15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | Fiber content $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | Fiber content $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| 3 d |  |  |  |  |  |
| 7 d |  |  |  |  |  |
| 28 d |  |  |  |  |  |

表 7 不同 SF 含量和养护龄期的充填试件在变角剪切试验下的破坏模式 (剪切角 60°)

Table 7 Failure modes of backfill specimens with different SF content and curing ages under variable-angle shear test (shear angle 60°)

| Curing age | Failure mode | | | | |
|------------|--|--|--|---|--|
| | Fiber content 0 | Fiber content 10 kg·m ⁻³ | Fiber content 15 kg·m ⁻³ | Fiber content 20 kg·m ⁻³ | Fiber content 25 kg·m ⁻³ |
| 3 d |  |  |  |  |  |
| 7 d |  |  |  |  |  |
| 28 d |  |  |  |  |  |

的平台^[30]. 在本研究中, 充填体和钢纤维增强充填体试件微观结构形貌如图 11 所示. 图 11(b) 为充填体样品的能谱图, 元素主要为 C、O、Si、Ca 和 Al 等, 上述元素含量为 96.11%, 能谱仪 (EDS) 结果分析表明, 未经纤维增强的充填体样品水泥水化产物包括水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶、絮状钙矾石 (Aft) 和块状氢氧化钙 (CH) 晶体. 由图 11(c) 可知, SF 表面附着了少量的水化产物, 界面过渡区 (ITZ) 处水化产物连接松散, 空隙较大. 因此, SF 与水泥-尾砂基体之间的粘结力较弱, 导致试件的力学性能相较于非纤维增强充填体试件提高幅度不高, 在少量 SF 掺量的情况下, 水泥基体的力学性能主要取决于的内部基体结构而非 SF^[31]. 添加钢纤维后, 尾砂颗粒、纤维和水化产物形成了一个完整且更致密的结构, 从而控制裂纹的发展并使得钢纤维增强充填体试件相比于非纤维增强充填体试件能够承受更高的峰值应力.

从图 11(d) 和图 11(e) 发现纤维的表面出现了磨损和破裂, 这是因为在加载过程中由于裂纹扩展, 纤维被拔出, 在被拔出的纤维的某些部分中, 残留了一定的水化产物附着在 SF 表面, SF 通过

与周围的水泥-尾砂基体摩擦来吸收外部载荷的能量, 导致受损纤维的表面磨损和破裂, 水化产物的存在增加了 SF 表面的粗糙度, 增加了 SF 与基体之间的摩擦力从而吸收更多的断裂能, 随着纤维掺量的增加, 更多的纤维在试件产生裂纹时通过拔出作用吸收更多的断裂能, 控制裂纹的发展并使得钢纤维增强充填体样品相比于充填体样品能够承受更高的峰值应力, 这也解释了钢纤维增强充填体的抗压强度、抗拉强度及抗剪强度高于非纤维增强充填体样品. 在阈值 (20 kg·m⁻³) 之后进一步增加纤维含量会对水泥基体结构产生负面影响, 导致孔隙率增加, 最终导致充填体的力学性能下降^[10].

3.2 强度计算模型

以充填体强度试验数据为基础, 利用 SPSS 曲线估计构建充填体强度最优计算模型, 具体步骤如下^[32]:

(1) 利用曲线估计构建 SF 质量与充填体强度的一元非线性回归模型, 参与拟合的模型有线性函数、对数函数、逆函数、二次函数、三次函数、复合函数、幂函数、S 函数、增长函数、指数函数,

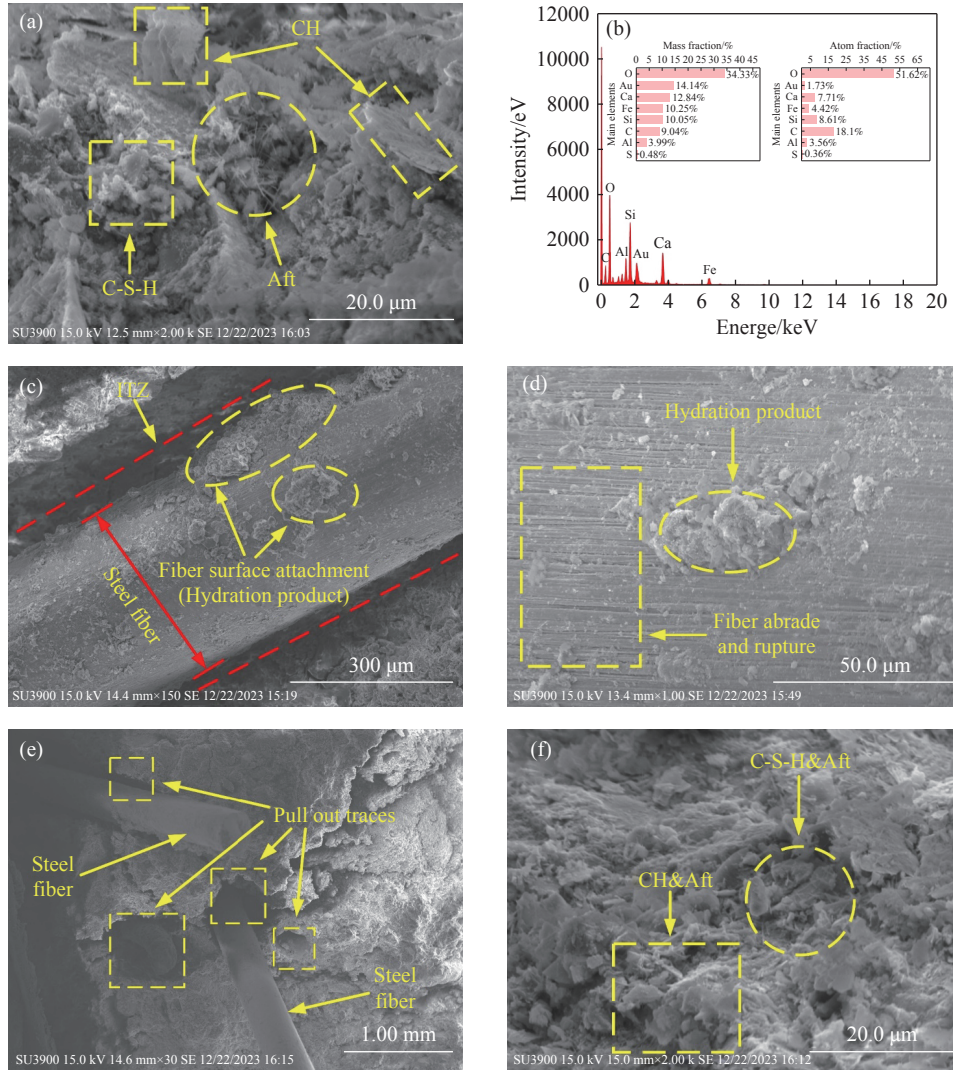


图 11 尾砂胶结充填体 (CTB) 和不同 SF 掺量的 FR-CTB 试件微观结构形貌。(a) CTB; (b) EDS 能谱图; (c) $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (d) $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (e) $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (f) $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Fig.11 Microstructure of CTB and FR-CTB samples with different SF content: (a) CTB; (b) EDS energy spectrum; (c) $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (d) $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (e) $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; (f) $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

根据拟合优度 R^2 确定最优拟合模型;

(2) 以单轴抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验数据为基础, 回归计算 y_i 、 Y_i 中各参数值并代入模型。

利用曲线估计分别拟合 SF 质量与 UCS、STS 的一元非线性模型, 拟合优度 R^2 结果见表 8, 其中 y_{3d} 、 y_{7d} 、 y_{28d} 为 SF 影响下 3、7、28 d 的 UCS 值, Y_{3d} 、 Y_{7d} 、 Y_{28d} 为 SF 掺量影响下 3、7、28 d 的 STS 值。

根据 R^2 最大原则, 为简化计算模型确定最优模型为二次模型 $y_i/Y_i = ax^2 + bx + c$, 式中, x 为 SF 质量, a 、 b 、 c 为模型参数。在 SPSS 中构建一元非线性模型回归计算各系数并代入模型, 得到:

UCS 的最优计算模型: $y_{3d} = 8.774x - 636.418x^2 + 0.568$, $y_{7d} = 159.297x - 13046.601x^2 + 0.64$, $y_{28d} = 303.972x - 25624.766x^2 + 0.923$

STS 的最优计算模型: $Y_{3d} = 23.776x - 5206.164x^2 +$

0.059 , $Y_{7d} = 124.286x - 31236.985x^2 + 0.055$, $Y_{28d} = 301.939x - 86422.324x^2 - 0.014$

为验证模型精度, 以试验为基础数据, 通过计算模型获得各龄期的强度计算值, 计算各组实测值与计算值绝对误差, 结果见表 9。由表 9 可知, UCS 在各龄期计算模型平均绝对误差为: 0.0058、0.0254、0.043, STS 在各龄期计算模型平均绝对误差为: 0.0013、0.0072、0.012。由图 12 可知, 计算值与实测值变化趋势一致, 且总体偏差较小, 所以本文建立的掺钢纤维充填体强度计算模型精度较高, 可以用于掺钢纤维充填体强度进行预测。

4 结论

本文通过宏观力学试验、DIC 全场应变监测、SEM 微观图像分析的方法探究 SF 对充填体的宏

表 8 曲线估计模型计算结果

Table 8 Model calculation results of curve estimation

| Model | R^2 | | | | | |
|-------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| | Y_{3d} | Y_{7d} | Y_{28d} | Y_{3d} | Y_{7d} | Y_{28d} |
| Linear | 0.065 | 0.06 | 0.067 | 0.741 | 0.422 | 0.015 |
| Log | 0.076 | 0 | 0.024 | 0.817 | 0.494 | 0.049 |
| Inverse | 0.075 | 0.011 | 0.04 | 0.874 | 0.536 | 0.092 |
| Quadratic | 0.145 | 0.672 | 0.749 | 0.851 | 0.69 | 0.706 |
| Cubic | 0.182 | 0.789 | 0.848 | 0.851 | 0.727 | 0.762 |
| Composite | 0.065 | 0.009 | 0.08 | 0.736 | 0.452 | 0.011 |
| Power | 0.075 | 0 | 0.032 | 0.814 | 0.526 | 0.043 |
| S | 0.074 | 0.008 | 0.007 | 0.874 | 0.57 | 0.086 |
| Growth | 0.065 | 0.009 | 0.08 | 0.736 | 0.452 | 0.011 |
| Exponential | 0.065 | 0.009 | 0.08 | 0.736 | 0.452 | 0.011 |

表 9 计算模型绝对误差

Table 9 Absolute error of calculation model

| UCS _{3d} calculated value/MPa | Absolute error | UCS _{7d} calculated value/MPa | Absolute error | UCS _{28d} calculated value/MPa | Absolute error | STS _{3d} calculated value/MPa | Absolute error | STS _{7d} calculated value/MPa | Absolute error | STS _{28d} calculated value/MPa | Absolute error |
|--|----------------|--|----------------|---|----------------|--|----------------|--|----------------|---|----------------|
| 0.591 | 0.0029 | 1.040 | 0.0120 | 1.677 | 0.0208 | 0.077 | 0.0003 | 0.147 | 0.0031 | 0.199 | 0.0059 |
| 0.597 | 0.0086 | 1.118 | 0.0388 | 1.814 | 0.0653 | 0.083 | 0.0023 | 0.170 | 0.0113 | 0.243 | 0.0182 |
| 0.598 | 0.0088 | 1.114 | 0.0378 | 1.791 | 0.0646 | 0.086 | 0.0016 | 0.179 | 0.0104 | 0.246 | 0.0183 |
| 0.596 | 0.0028 | 1.029 | 0.013 | 1.608 | 0.0214 | 0.086 | 0.001 | 0.172 | 0.0039 | 0.207 | 0.0056 |
| Mean | 0.0058 | Mean | 0.0254 | Mean | 0.043 | Mean | 0.0013 | Mean | 0.0072 | Mean | 0.012 |

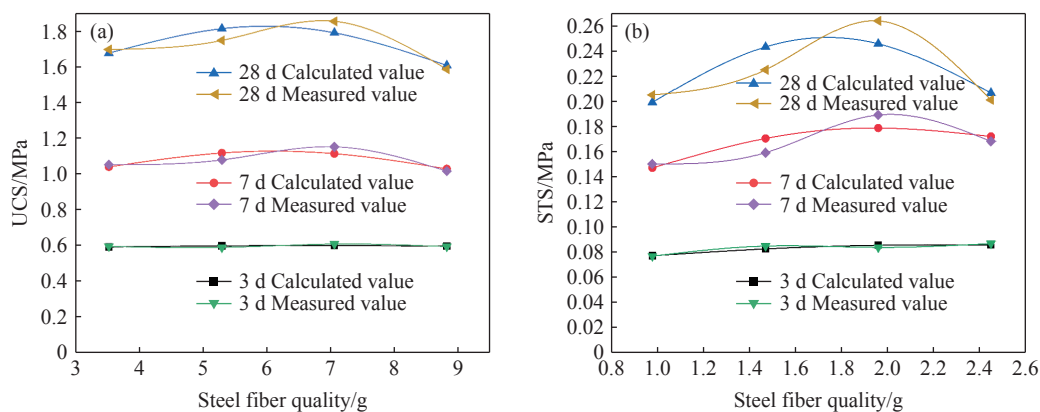


图 12 FR-CTB 强度计算值和实测值的比较。(a) 单轴抗压强度试验; (b) 劈裂抗拉强度试验

Fig.12 Comparison of FR-CTB strength between calculated and measured values: (a) UCS test; (b) STS test

观力学性能、裂纹演化机制、内部微观结构的影响,最后建立强度计算模型,得出以下主要结论:

(1) 当 SF 的掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, SF 对充填体的力学性能的增强效果最好,当超过 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,充填体力学性能都有不同程度的下降,但均高于非纤维增强充填体。

(2) 在不同力学试验下,钢纤维增强充填体体

现出不同的应力-应变行为和破坏模式,其中单轴抗压强度试验和变角剪切试验具有相似的应力应变行为,由于纤维的存在削弱了裂隙尖端应力集中的作用,有效阻止了裂纹的扩展,改善整个试件的变形,试件的应变集中区域呈减小的趋势,且各力学试验下均在 SF 掺量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时充填体试件的最大峰值主应变达到最低,此时 SF 对充填体

试件起到了最好的阻裂作用。

(3) 钢纤维增强充填体的力学性能主要受 SF 在水泥-尾砂基体中出桥接和拔出行为的影响, 水化产物的存在增加了 SF 表面的粗糙度, 从而增加了 SF 与基体之间的摩擦力, 加纤维的充填体试件在加载过程中消耗更多的断裂能, 最终导致含钢纤维充填体强度增加。以一元非线性回归理论为基础, 结合 SPSS 曲线估计建立 3、7 和 28 d 充填体强度的计算模型, 计算值与实测值变化趋势一致, 且总体偏差较小, 模型精度较高, 可对掺钢纤维充填体强度进行预测。

参 考 文 献

- [1] Cheng H Y, Wu A X, Wu S C, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines. *Chin J Eng*, 2022, 44(1): 11
(程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势. *工程科学学报*, 2022, 44(1): 11)
- [2] Cheng H Y, Liu Z M, Wu S C, et al. Resistance characteristics of paste pipeline flow in a pulse-pumping environment. *Int J Miner Metall Mater*, 2023, 30(8): 1596
- [3] Abdelrazik A T, Khayat K H. Effect of fiber characteristics on fresh properties of fiber-reinforced concrete with adapted rheology. *Constr Build Mater*, 2020, 230: 116852
- [4] Xing G H, Xu Y C, Huang J, et al. Research on the mechanical properties of steel fibers reinforced carbon nanotubes concrete. *Constr Build Mater*, 2023, 392: 131880
- [5] Gou H X, Zhu H B, Zhou H Y, et al. Reinforcement of directionally distributed steel fibers on ultrahigh performance concrete. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(11): 1756
(苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1756)
- [6] Yuan M, Zhu N X, Yan D H, et al. Effect of steel fiber spacing on double fibers pullout performance of UHPC. *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2024, 51(3): 161
(袁明, 朱楠萱, 颜东煌, 等. 钢纤维间距对 UHPC 双丝拉拔性能的影响. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(3): 161)
- [7] Feo L, Ascione F, Penna R, et al. An experimental investigation on freezing and thawing durability of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC). *Compos Struct*, 2020, 234: 111673
- [8] Ashraf S, Rucka M. Microcrack monitoring and fracture evolution of polyolefin and steel fibre concrete beams using integrated acoustic emission and digital image correlation techniques. *Constr Build Mater*, 2023, 395: 132306
- [9] Liu Y W, Shi C J, Zhang Z H, et al. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. *Cem Concr Compos*, 2020, 112: 103665
- [10] Liew K M, Akbar A. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater*, 2020, 232: 117232
- [11] Cui X L, Liu Q, Li G Z. Study of strength properties and damage morphology of polypropylene fibers on cement-based composite filling materials. *Min Res Dev*, 2022, 42(8): 119
(崔秀丽, 刘庆, 李广洲. 聚丙烯纤维对水泥基充填复合材料强度性能及破坏形态的影响. *矿业研究与开发*, 2022, 42(8): 119)
- [12] Hou Y Q, Yin S H, Zhao G L, et al. Study on the mechanical and flow properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill. *Mater Rep*, 2021, 35(19): 19030
(侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究. *材料导报*, 2021, 35(19): 19030)
- [13] Chen X, Shi X, Zhang S, et al. Fiber-reinforced cemented paste backfill: The effect of fiber on strength properties and estimation of strength using nonlinear models. *Materials*, 2020, 13(3): 718
- [14] Zhao K, Zhao K, Yan Y, et al. Influence of different fibers on compressive toughness and damage of early age cemented tailings backfill. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, 30(13): 37449
- [15] Yang X B, Hou Y Q, Yin S H, et al. Mechanical properties and energy distribution evolution characteristics of fiber-reinforced cemented sulfur tailings backfill. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2022, 53(11): 4435
(杨晓炳, 侯永强, 尹升华, 等. 纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学性能及能量分配演化特征. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(11): 4435)
- [16] Yin S H, Cao Y, Wu A X, et al. Study on mechanics and flow behavior of glass fiber reinforced cemented sulfur tailings backfill. *Mater Rep*, 2023, 37(13): 246
(尹升华, 曹永, 吴爱祥, 等. 纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学及流动性能研究. *材料导报*, 2023, 37(13): 246)
- [17] Xiu Z G, Wang S H, Ji Y C, et al. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Constr Build Mater*, 2021, 271: 121526
- [18] Li J J, Cao S, Yilmaz E, et al. Compressive fatigue behavior and failure evolution of additive fiber-reinforced cemented tailings composites. *Int J Miner Metall Mater*, 2022, 29(2): 345
- [19] Zhang H, Cao S, Yilmaz E. Influence of 3D-printed polymer structures on dynamic splitting and crack propagation behavior of cementitious tailings backfill. *Constr Build Mater*, 2022, 343: 128137
- [20] Dadmand B, Sadaghian H, Khalilzadehtabrizi S, et al. Studying the compressive, tensile and flexural properties of binary and ternary fiber-reinforced UHPC using experimental, numerical and multi-target digital image correlation methods. *Case Stud Constr Mater*, 2023, 18: e01865
- [21] Wang Y M, Wu J Y, Pu H, et al. Effect of interface geometric parameters on the mechanical properties and damage evolution of layered cemented gangue backfill: Experiments and models. *Constr Build Mater*, 2022, 349: 128678
- [22] Li Z J, Hao J W, Gan D Q, et al. Research on the influence of consolidation time of filling slurry on crack propagation of granite based on DIC. *J Henan Polytech Univ (Nat Sci)*, 2019, 38(4): 1

- (李占金, 郝家旺, 甘德清, 等. 基于 DIC 技术的充填体固结时间对花岗岩裂纹扩展的影响研究. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 1)
- [23] Mo J X, Zeng L, Liu Y H, et al. Mechanical properties and damping capacity of polypropylene fiber reinforced concrete modified by rubber powder. *Constr Build Mater*, 2020, 242: 118111
- [24] Zhao K, Liu Z, Zeng P, et al. Fracture process analysis and acoustic emission response of cemented tailings backfill with different sizes under uniaxial compression. *Materials*, 2022, 15(22): 8038
- [25] Xue G L, Yilmaz E, Song W D, et al. Fiber length effect on strength properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill specimens with different sizes. *Constr Build Mater*, 2020, 241: 118113
- [26] Xue G L, Yilmaz E, Song W D, et al. Influence of fiber reinforcement on mechanical behavior and microstructural properties of cemented tailings backfill. *Constr Build Mater*, 2019, 213: 275
- [27] Huang X H. *Experimental Study on Shear Failure Characteristics of Red Sandstone after High Temperature Treatment* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2022
- (黄晓辉. 高温处理后红砂岩剪切破坏特性试验研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022)
- [28] Zhao K, Zhu S T, Zhou K P, et al. Mechanical properties of tantalum niobium tailings cemented concrete under different proportions and concentration. *J Basic Sci Eng*, 2020, 28(4): 833
(赵康, 朱胜唐, 周科平, 等. 不同配比及浓度条件下钽铌矿尾砂胶结充填体力学性能研究. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4): 833)
- [29] Xue X L, Gu Y T, Zhang X, et al. Mechanical behavior and microscopic mechanism of fiber reinforced coarse aggregate cemented backfill. *Constr Build Mater*, 2023, 366: 130093
- [30] Cao S, Yilmaz E, Yin Z Y, et al. CT scanning of internal crack mechanism and strength behavior of cement-fiber-tailings matrix composites. *Cem Concr Compos*, 2021, 116: 103865
- [31] Caggiano A, Xargay H, Folino P, et al. Experimental and numerical characterization of the bond behavior of steel fibers recovered from waste tires embedded in cementitious matrices. *Cem Concr Compos*, 2015, 62: 146
- [32] Zhang P, Gao Q, Wang Y T, et al. Study on strength of cemented backfill with limestone powder. *Min Res Dev*, 2021, 41(8): 41
(张鹏, 高谦, 王有团, 等. 掺石灰石粉的胶结充填体强度研究. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 41)