

文章编号:1001-4888(2023)04-0455-12

钢纤维混凝土力学性能优化与 裂纹扩展特性试验研究*

蒋京泰¹, 李地元¹, 汪小东², 余一松^{1,2}, 王勇兵³, 方旭刚³

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410019;

3. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南曲靖 655011)

摘要: 为探究复掺钢纤维下混凝土力学性能和裂纹扩展特性, 利用云南会泽某深部矿山现场所取的砂、石、水泥等材料制成不同钢纤维掺量的混凝土试样, 通过四点弯曲、劈裂拉伸和单轴压缩等试验获取试样抗折、抗拉和抗压强度, 并借助数字图像相关技术(DIC)分析试样破坏和表面应变演化特征, 优选出钢纤维混凝土配方应用于矿山竖井衬砌支护。同时对观测图像进行形态学处理, 估算裂纹长度与裂纹扩展速度。试验结果表明: 相较于对照组, 添加钢纤维后混凝土试样的抗拉强度提升了46%~83%、抗折强度提升了24%~39%。钢纤维混凝土配方中, 三掺钢纤维配方(40kg/m³长纤维, 5kg/m³中长纤维, 10kg/m³短纤维)对混凝土抗拉、抗折强度提升效果最佳, 对残余强度和韧性指数的提升幅度最大。随着钢纤维尺寸种类的增加, 试样位移-荷载峰后曲线斜率逐渐降低, 同时混凝土试样内部固结后形成金属网结构的孔隙度降低, 混凝土试样表面剥落量和裂纹衍生数量不断减少, 到达峰值荷载时试样最大主应变降低。随着钢纤维种类增加, 混凝土表面裂纹扩展平均速度减缓, 相对起裂应力(起裂应力与峰值应力比值)逐渐降低, 三掺钢纤维混凝土试样相对起裂应力最低(71%峰值荷载), 平均裂纹扩展速度最慢(7.38mm/s)。

关键词: 钢纤维混凝土; 抗折强度; 数字图像相关; 裂纹扩展

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-212

0 引言

混凝土衬砌支护技术被广泛应用于矿山巷道和隧道工程建设之中, 但随着开采深度的增加、地应力的增大, 普通混凝土衬砌支护技术往往存在一定的应用局限性, 出现支护后衬砌开裂现象, 为此, 在一些深部地下工程中, 钢纤维混凝土衬砌材料得到了推广应用^[1-2]。本文以云南会泽某深部矿山竖井钢纤维混凝土衬砌支护工程为背景, 开展衬砌支护技术优化研究。根据矿山生产现状, 矿山竖井掘进产生的废矸石量较大, 废石出井运输成本高, 地表堆放存在占用场地且有二次环境污染问题。而用于竖井衬砌支护的钢纤维混凝土材料需要消耗大量砂石等粗细骨料, 将废矸石进行简单物化处理后可用于矿山巷道、竖井的衬砌支护之中, 不仅可降低钢纤维混凝土材料成本, 还可解决废石堆放问题。另外, 在支护安全稳定方面, 不同钢纤维的组合、掺量直接影响钢纤维混凝土材料的力学性能与破坏模式, 本文拟通过室内试验研究, 优选出性能最佳钢纤维混凝土配方, 提高该矿山竖井施工效率, 保障矿山安全高效生

* 收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 52074349); 校企合作项目: 超深井高地压复杂环境下开采关键技术研究

通信作者: 李地元(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事深部岩石力学、断裂力学等研究。Email: diyuan.li@csu.edu.cn

产。

针对复掺钢纤维对混凝土力学性能的影响,学者们从钢纤维类别、尺寸、掺量等方面开展了研究^[3-4]。杜任远等^[5]对抗拉强度的研究表明,随着钢纤维体积率、长径比、掺量的增加,钢纤维混凝土抗拉强度呈线性增大规律。同时一些学者针对抗折强度研究表明^[6-7],随着钢纤维掺量增加,抗折强度的尺寸效应更为明显,抗折强度呈现先升高后降低趋势。徐礼华等^[8]的研究表明,随着钢纤维长径比的增加,混凝土抗压强度尺寸效应随之提升。关于复掺钢纤维混凝土破坏模式与开裂特性,郭东明等^[9]运用 CT 扫描对裂纹衍生、扩展过程进行了分析与反演。宁建国等^[10]通过建立细观混凝土力学模型得出混凝土骨料粒径越大、裂纹扩展越剧烈的结论。吴佰建等^[11]利用数值模拟对混凝土破坏过程中的裂纹衍生与扩展进行了模拟分析。综上所述,目前关于钢纤维混凝土裂纹扩展监测及全场应变演化的研究较欠缺,针对钢纤维尺寸效应影响混凝土力学性能的研究较少。故结合矿山竖井衬砌支护现状,优化钢纤维混凝土配方、探究不同纤维尺寸、掺量对混凝土力学性能和裂纹扩展的影响是必要的。

基于以上研究背景,本文结合云南会泽矿山深部竖井衬砌支护后存在钢纤维混凝土剥落,钢筋裸露的现状,利用矿山现场砂、石等材料,制成不同水泥标号、不同钢纤维组合方式的混凝土标准试样,测试抗拉、抗折与抗压强度与韧性指标,探究复掺钢纤维混凝土力学性能增强机理,以获取力学性能最优的复掺钢纤维混凝土配方应用于矿山深部竖井衬砌支护;同时借助非接触式数字图像相关技术观测试样全场应变演化与破坏模式,并对观测图像进行形态学处理,求算裂纹扩展参数,研究复掺钢纤维混凝土裂纹扩展规律。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

水泥采用矿山现场的 3 种型号水泥 P32.5、42.5、52.5(图 1c),粗骨料取自矿山现场处理后的废矸石,粒径为 10mm~20mm 连续级配(图 1a),细骨料模数为 2.8,密度为 2135kg/m³(图 1b);外加剂采用建华公司 BR 型高性能复合剂(图 1d),掺量为水泥质量的 8%;长钢纤维选用普方公司生产的端钩型纤维(长度 $L=50\text{mm}$,直径 $D=0.6\text{mm}$);中长钢纤维、短钢纤维选用镀铜型纤维($L=30\text{mm}$, $D=0.35\text{mm}$)、($L=13\text{mm}$, $D=0.18\text{mm}$),钢纤维掺量固定为 55kg/m³;将以上材料搅拌、养护、喷涂散斑后开展试验。四点弯曲试验的混凝土试样尺寸为 100mm×100mm×400mm,劈裂拉伸与压缩试验中试样尺寸为 150mm×150mm×150mm。试样制备流程如图 1 所示。将废矸石骨料磨成粉末状,基于 XRD 测试开展物相分析试验研究,XRD 谱图如图 2 所示,由图可知,矸石主要成分白云岩占比达 92%,石英、云母、方解石共占比 8%。

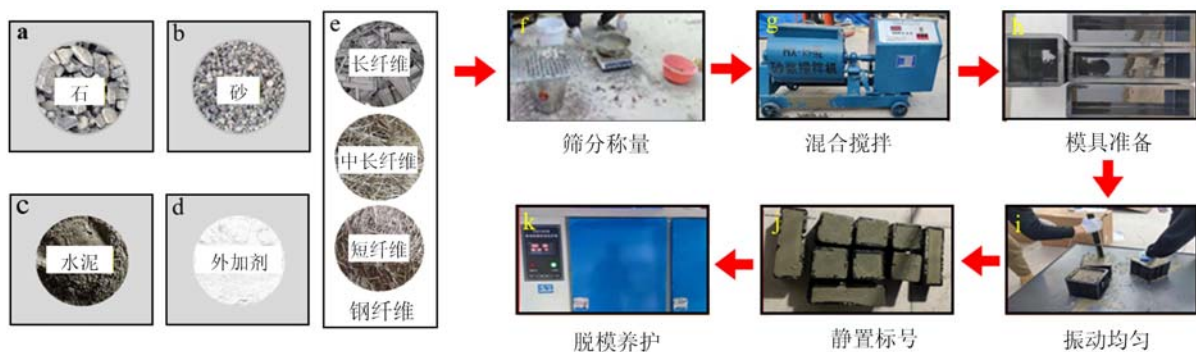


图 1 材料准备与标准试样制备流程

Fig. 1 Material preparation and standard sample preparation

1.2 测试系统

为获取不同钢纤维配方下混凝土试样的力学性能与破坏模式,利用 INSTRON 1342、1346 液压伺服试验系统对试样开展单轴压缩、劈裂拉伸、四点弯曲试验。单轴压缩试验加载速度为 600kN/min;劈裂拉伸、四点弯曲试验中运用力转位移方式施加荷载。四点弯曲试验示意图如图 3 所示,图 3(c)中 4

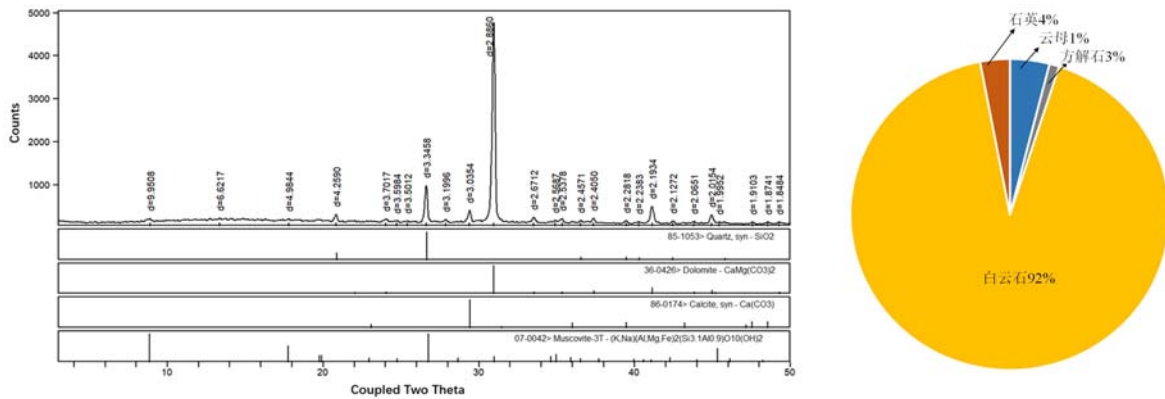


图 2 矽石骨料的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD spectra figure of waste rock aggregate

个特征点表示试样的弹性点、第一峰值点、第二峰值点、失稳破坏点。试验开始前,需在待测试样表面喷涂人工散斑。喷涂方法为先用砂纸将四点弯曲试样表面打磨平滑,再利用哑光白色颜料重复 3 次喷扫试样待观测表面,以此保证颜料均匀覆盖。待白色颜料风干后,运用同样方式喷涂黑色颜料至均匀覆盖。喷洒颜料不宜过厚,过厚会影响裂纹起裂和扩展,过少会影响 DIC 设备观测。为方便相机捕捉和优化处理,单粒径等于 2 个相邻散斑间距离为最佳粒径^[12]。

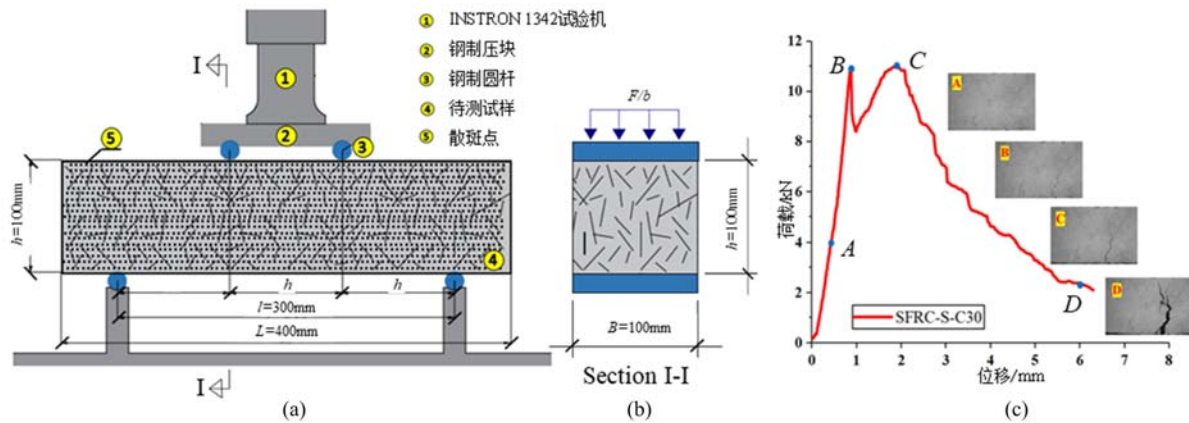


图 3 四点弯曲试验与典型试样荷载-位移(P-S)曲线

Fig. 3 Four-point bending test and typical sample load-displacement(P-S) curve

DIC 观测设备由计算机系统、静态相机及支架、光源构成。将均匀喷涂散斑的四点弯曲试样放置于试验机上,通过荷载控制系统施加荷载至试样破坏,其间使用 DIC 设备记录试样裂纹扩展全过程,静态相机单张拍摄间隔为 0.1s,单轴压缩与劈裂拉伸试验步骤类似,不再赘述。喷涂散斑的试样和试验设备如图 4 所示。

2 试验结果

2.1 钢纤维混凝土力学性能

根据云南会泽铅锌矿山竖井原始衬砌支护方案,设计了 3 种水泥标号(P30、P40、P50),4 种钢纤维掺杂方式(不掺、单掺、双掺、三掺)为试验变量进行配方优选。试验中单掺钢纤维混凝土配方 9 种、双掺钢纤维混凝土配方 6 种、三掺钢纤维混凝土配方 8 种,不掺钢纤维混凝土为对照组,共计 24 种钢纤维混凝土配方分别开展单轴压缩、劈裂拉伸、四点弯曲试验。综合试验测试结果,优选出不同水泥标号下单掺、双掺、三掺钢纤维混凝土配方各一项进行力学性能与裂纹扩展特性研究。根据 ASTM C 材料协会标准^[13],选取韧性指标 I 和残余强度指标 R 对不同钢纤维配方下的试样进行韧性分析^[14](如图 5 所示),图中 P 点为初裂点,对应的横坐标为初裂挠度 δ ,根据初裂挠度的 3.0 倍、5.5 倍、10.5 倍来确定

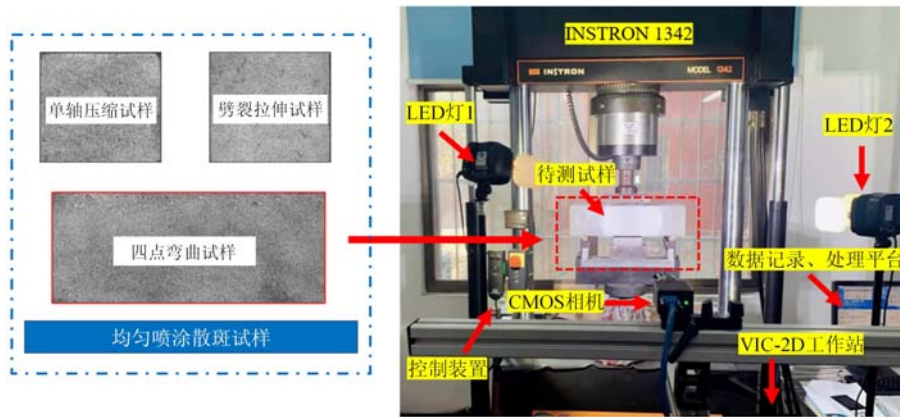


图4 喷涂散斑的试样和试验设备

Fig. 4 Spraying speckle samples and test apparatus

C、D、E点，Q点为峰值荷载点。韧性指标 I_5 、 I_{10} 的计算方法为图5中 C(3.0 δ)、D(5.5 δ) 两点位置曲线包围形成的面积 S_{OPMC} 、 S_{OPND} 与初始起裂点 δ 形成面积 S_{OPA} 之比，即 $I_5 = \frac{S_{OPMC}}{S_{OPA}}$ ， $I_{10} = \frac{S_{OPND}}{S_{OPA}}$ 。针对残余强度，引入系数 R 作为评价指标 ($R=20(I_{10} - I_5)$)，不加钢纤维混凝土的 R 值为 0。

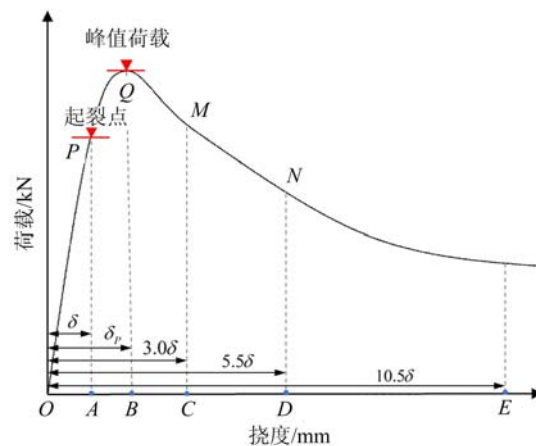


图5 弯曲韧性指数示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bending toughness index

试验结果汇总见表1。由表1可知，针对试样C30，添加钢纤维后混凝土试样抗压、抗拉、抗折强度相较于对照组试样(C-30)提升范围分别为4%~13%、46%~72%、27%~39%；相较于单掺钢纤维混凝土配方，三掺钢纤维混凝土韧性指数最高韧性指数 I_5 提升了11.3%， I_{10} 提升了10.9%。残余强度相对较大，残余强度针对试样C40，添加钢纤维后试样抗压、抗拉、抗折强度相较于对照组试样(C-40)提升范围分别为12%~17%、58%~82%、24%~34%；相较于单掺钢纤维混凝土配方，三掺钢纤维混凝土韧性指数最高韧性指数 I_5 提升了5.5%， I_{10} 提升了6.7%。针对试样C50，添加钢纤维后试样抗压、抗拉、抗折强度相较于对照组试样(C-50)分别提升13%~19%、61%~83%、24%~35%；相较于单掺钢纤维混凝土配方，三掺钢纤维混凝土韧性指数最高韧性指数 I_5 提升了17.4%， I_{10} 提升了10.1%。可见钢纤维的加入对于混凝土抗拉强度提升幅度最大(超过45%)；三掺钢纤维混凝土配方韧性提升效果最佳。将C30和C50组试样劈裂拉伸、四点弯曲试验的复掺钢纤维混凝土试样作为研究对象，绘制位移-荷载曲线如图6、图7所示。

根据图6可知，钢纤维混凝土的抗拉强度随着钢纤维种类的增多而显著增强。同一水泥标号下三掺钢纤维混凝土配方(40kg/m³长钢纤维, 5kg/m³中长钢纤维, 10kg/m³短钢纤维)的抗拉强度最佳。在图6(a)中，试验加载的峰后曲线可分两类，未添加钢纤维试样(Ⅱ类)到达峰值后能量释放迅速，曲线呈

直线迅速下降；加入钢纤维后，试样到达峰值荷载后存在残余强度，变形量大，呈延性破坏(I类)。随着钢纤维种类增加，试样峰后曲线斜率降低，到达峰值荷载后能量释放速度减缓，试样变形量增大^[15]。当水泥标号增至 52.5 时，试样峰后强度曲线可分为 3 类(图 6(b))，相较于单、双掺量钢纤维混凝土，三掺钢纤维混凝土试样峰后曲线斜率最小，由于内部复掺纤维的作用下能量释放最慢，试样变形最大。

表 1 钢纤维混凝土强度测试与分析结果

Tab.1 Strength test results of steel fiber concrete samples

试样编号	钢纤维尺寸/(kg/m ³)			力学强度测试结果 /MPa			I _s	I ₁₀	R	水泥标号
	长型	中长型	短型	单轴抗压强度	劈裂拉伸强度	抗折强度				
C-30	/	/	/	23.84	1.25	2.59	/	/	0	P30
SFRC-S-30	55	/	/	24.89	1.84	3.31	3.89	6.42	50.60	
SFRC-D-30	15	/	40	26.96	1.93	3.54	4.15	6.72	51.40	
SFRC-T-30	40	5	10	25.92	2.15	3.62	4.33	6.91	51.60	
C-40	/	/	/	33.92	1.78	3.48	/	/	0	P40
SFRC-S-40	55	/	/	38.24	2.82	4.51	3.58	6.06	49.60	
SFRC-D-40	15	/	40	39.96	2.95	4.33	3.74	6.32	51.60	
SFRC-T-40	40	5	10	38.92	3.24	4.68	3.78	6.46	53.60	
C-50	/	/	/	43.61	2.47	4.17	/	/	0	P50
SFRC-S-50	55	/	/	49.41	3.99	5.18	3.17	5.56	47.80	
SFRC-D-50	15	/	40	51.96	4.35	5.43	3.45	5.89	48.40	
SFRC-T-50	40	5	10	50.92	4.52	5.66	3.60	6.15	51.00	

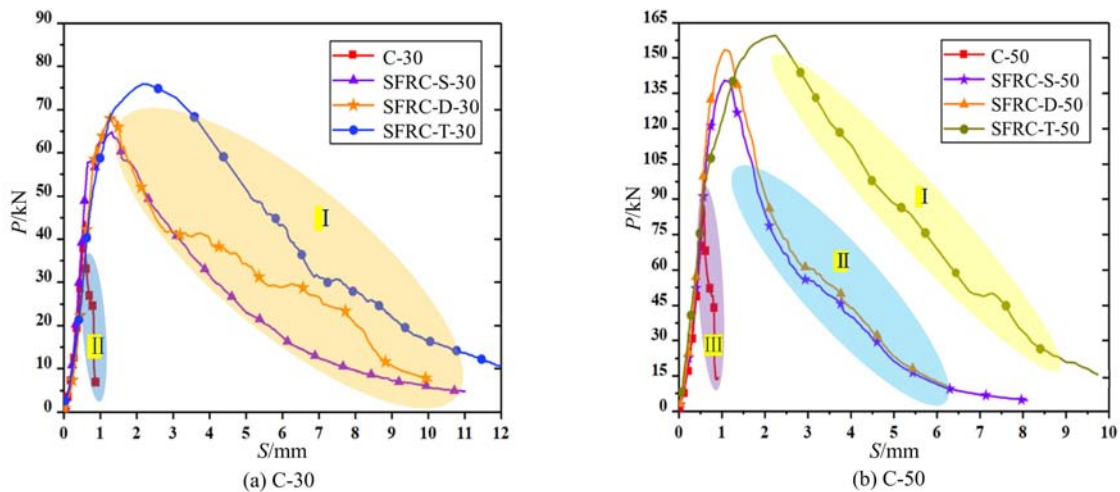


图 6 不同水泥标号下钢纤维混凝土试样劈裂拉伸试验位移-荷载曲线

Fig. 6 Displacement-load curve of split tensile test of steel fiber concrete samples with different grades of cement

由图 7 可知，钢纤维混凝土的抗折强度随着钢纤维种类的增多而增大，三掺钢纤维混凝土试样抗折强度提升最大。随着外部荷载的施加，混凝土材料强度到达峰值，曲线出现第一个峰值点，此时由于内部钢纤维结构的作用试样可继续承载，裂纹随着荷载施加而不断延伸扩展至断面半数钢纤维被拔出时，到达第二个峰值点，这类现象反应在曲线中称为双峰现象^[16]。试样在断面未失效纤维的作用下强度曲线缓缓下降，存在较大残余强度。当试样断面的钢纤维全部失效后，试样失去承载能力。

对于劈裂拉伸试验，当钢纤维混凝土试样到达峰值荷载时，试样表面裂纹衍生情况如图 8a~c 所

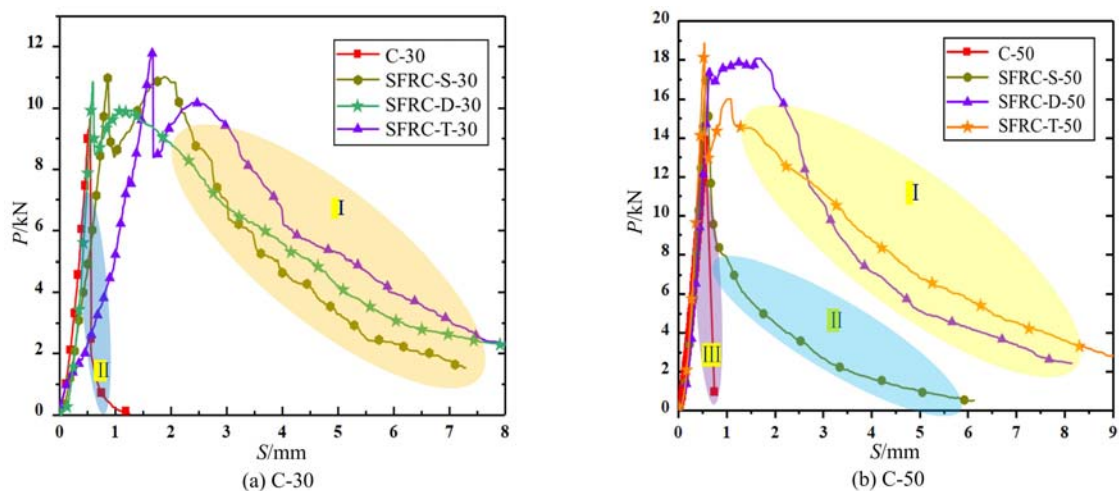


图7 不同水泥标号下钢纤维混凝土试样四点弯曲试验位移-荷载曲线

Fig. 7 Displacement-load curve of four-point bending test of steel fiber concrete samples with different grades of cement

示,图中 I 区表示剥落带与破碎带,由图可知,随着钢纤维种类的增加,试样表面剥落明显减少。针对四点弯曲试验,试样表面裂纹衍生情况如图 8d~f 所示,图中 I 表示裂纹扩展区,II 表示剥落区,由图可知,单掺钢纤维混凝土到达峰值荷载时 I 区衍生大量细长裂纹,同时表面剥落较为严重,随着钢纤维种类的增加,I 区衍生裂纹数量和 II 区剥落量逐渐减少,试样表面完整性得到有效控制。

混凝土试样内散落分布的钢纤维固结时形成近似金属状的锚网结构,提升了混凝土抗拉、抗折强度,网状结构近似如图 8a₁~c₁ 所示。矿山现场使用单掺直长型钢纤维混凝土进行衬砌支护,混凝土内部直长钢纤维固结后形成了大孔隙的金属网结构(图 8a₁),大孔隙不能有效阻止微裂纹的衍生,因此后期在高地应力作用下出现井壁部分剥落、钢筋裸露等现象。

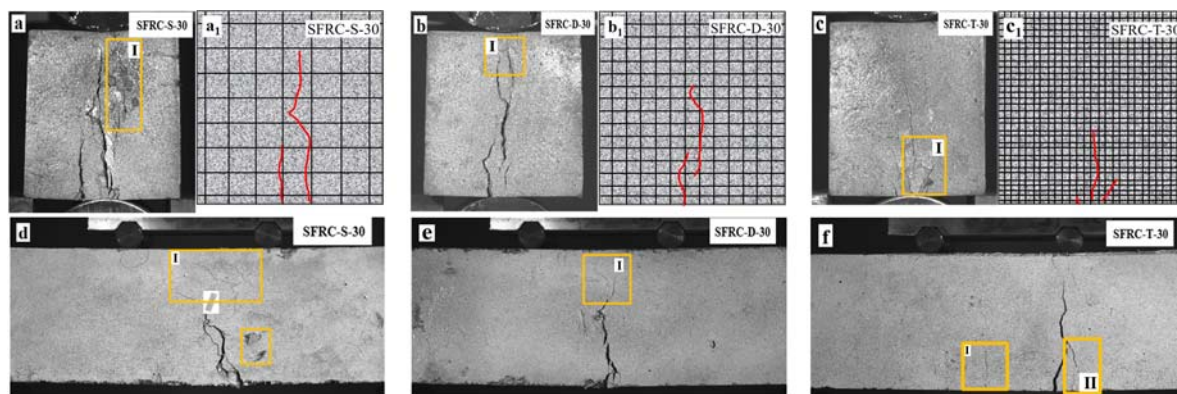


图8 钢纤维混凝土试样破坏断面情况

Fig. 8 Failure surface of steel fiber concrete sample

随着钢纤维复掺种类的增加,试样内部固结后形成的金属网结构的孔隙度不断降低(图 8c₁),更为致密的金属网结构能够良好地控制微裂纹的衍生,因此混凝土试样表面剥落量和裂纹衍生数量不断减少,表面完整性得到了有效控制。

2.2 破坏模式与应变演化

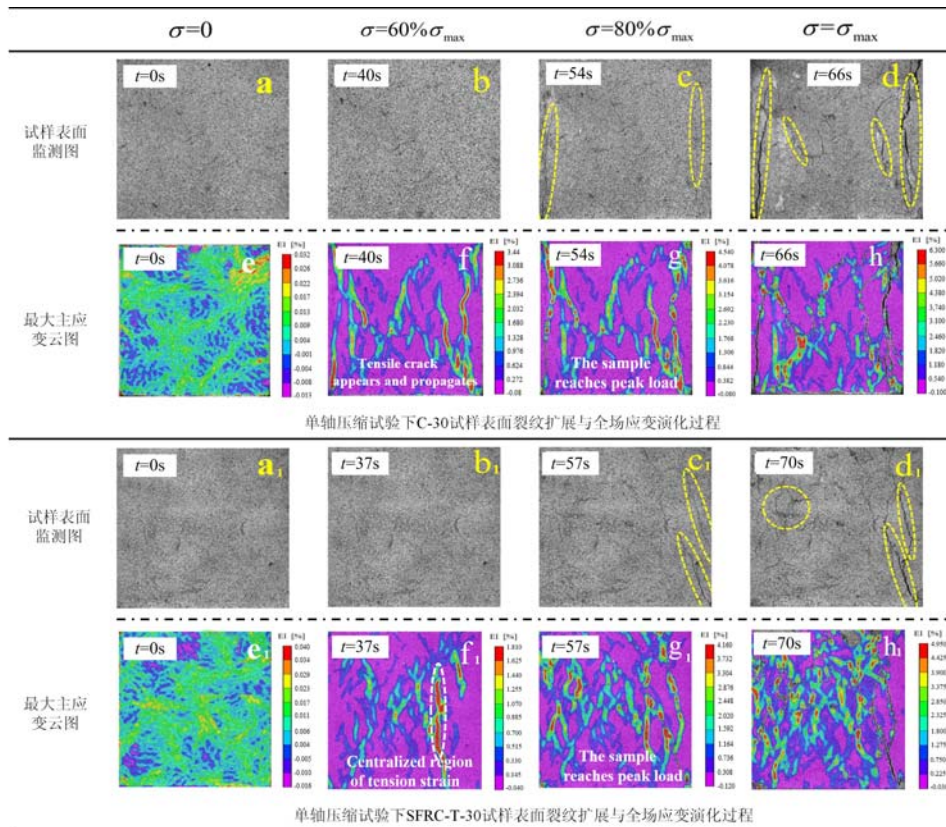
运用数字图像相关技术对单轴压缩、劈裂拉伸、四点弯曲试验中试样 C-30、SFRC-T-30 表面应变场进行观测,获取单轴压缩试验 4 个不同应力段应变演化云图(σ 为 0、60% σ_{max} 、80% σ_{max} 、100% σ_{max})见表 2。

针对单轴压缩试验,试样(C-30)最大主应变场演化过程见表 2 中图 e~h,试验开始时($\sigma=0$)试样表面完整,无应变集中现象;当 $t=40s$ ($\sigma=60\% \sigma_{max}$)时,试样处于弹性阶段,试样左右两端出现絮状应变

集中带(表 2 中图 f),同时表面衍生微裂纹;随着裂纹延伸至 54s($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,试样底部两侧衍生出细长裂纹(表 2 中图 c),此时试样表面最大主应变为 4.5%;随着荷载继续施加,裂纹扩展至 $t=66s$ ($\sigma=\sigma_{max}$)时,右端出现大范围变形,试样表面部分剥落(表 2 中图 d)。针对 SFRC-T-30 试样的单轴压缩试验,加载至 $t=37s$ ($\sigma=60\% \sigma_{max}$)时,试样中部靠右端位置出现狭长应变带(表 2 中图 f₁);随着裂纹延伸至 57s($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,底部右侧衍生出两条细长宏观裂纹(表 2 中图 c₁),相较于素混凝土试样而言,此时在内部网状钢纤维结构的作用下试样可继续承载;当 $t=70s$ ($\sigma=\sigma_{max}$)时,试样中部、右侧均出现大范围宏观裂纹,试样表面最大主应变为 4.95%(表 2 中图 h₁)。

表 2 单轴压缩试验中表面裂纹扩展与全场主应变演化云图

Tab.2 Surface crack propagation and full-field major strain evolution under uniaxial compression test



对于劈裂拉伸试验,试样 C-30 最大主应变场演化过程见表 3 中图 e~h,试验开始时($\sigma=0$),试样表面无应变集中现象;当加载至 $t=38\text{ s}$ ($\sigma=60\% \sigma_{max}$)时,上下两端出现局部应变集中(表 3 中图 f),试样处于弹性阶段;持续加载至 43s($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,试样中部出现细长应变带;当裂纹扩展至 $t=52s$ ($\sigma=\sigma_{max}$)时,试样表面部分剥落,中部出现一条完整裂纹,试样到达峰值荷载,由图 6(a)可知试样已失去承载能力。针对 SFRC-T-30 试样的劈裂拉伸试验,当 $t=47s$ ($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,试样底部衍生出宏观裂纹,此时试样表面最大主应变为 3.24%,远大于同期对照组(表 3 中图 g);随着裂纹扩展衍生至 $t=60s$ ($\sigma=\sigma_{max}$)时,试样表面出现剥落,底部出现梯形裂纹集中区(表 3 中图 h₁),此时试样到达峰值荷载,由图 6(a)可知试样仍然存在一定残余强度,且相对单掺、双掺配方而言,三掺钢纤维混凝土配方残余强度最大(图 6(a))。

针对四点弯曲试验,选取试样 3 个不同应力段(σ 为 0、 $80\% \sigma_{max}$ 、 $100\% \sigma_{max}$)的应变演化云图为研究对象,将云图与实物图汇总(表 4)。由表 4 可知,针对 C-30 试样,试验开始时($\sigma=0$),试样表面完整、无应变集中现象;加载至 $t=40s$ ($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,底端中部出现应变集中带并向上衍生(表 4 中图 e),同时表面出现宏观裂纹;裂纹扩展至 $t=47s$ ($\sigma=\sigma_{max}$)时,试样到达峰值荷载,由图 6(a)可知试样失去承载能力(表 4 中图 f),此时表面裂纹未贯穿试样,最大主应变为 2.10%。针对 SFRC-T-30 试样的四点弯曲试验,加载至 $t=64s$ ($\sigma=80\% \sigma_{max}$)时,试样中部出现树状应变集中带,并向上呈枝状发育^[17](表 4 中

图 e₁),此时试样底端出现裂纹;当加载至 $t=81s(\sigma=\sigma_{max})$ 时,裂纹上方出现网状应变带,此时底部裂缝张口变形量大(表4中图 f₁),试样到达第一个峰值点并存在一定残余强度,当加载至 $t=95s(\sigma=86\% \sigma_{max})$,试样底部裂缝张口增大,试样到达第二个峰值荷载点,由图7(a)可知,相对单掺、双掺配方而言,三掺钢纤维混凝土配方残余强度依旧最大。

表3 劈裂拉伸试验中表面裂纹扩展与全场主应变演化云图

Tab.3 Surface crack propagation and full-field major strain evolution under splitting tensile test

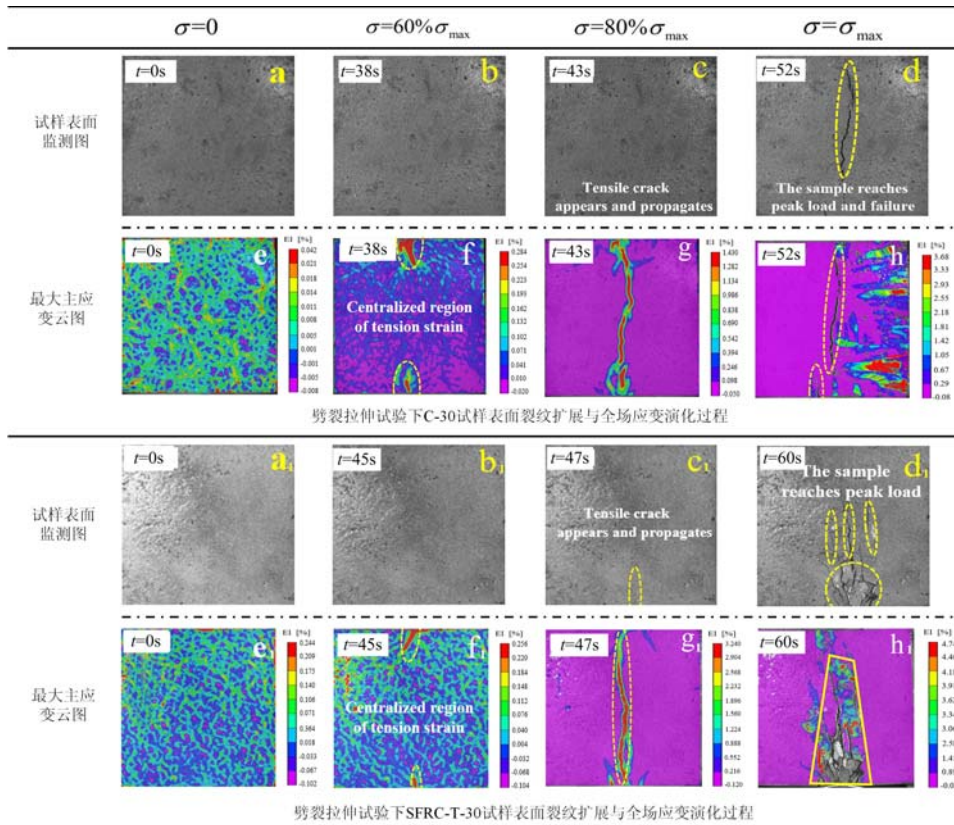
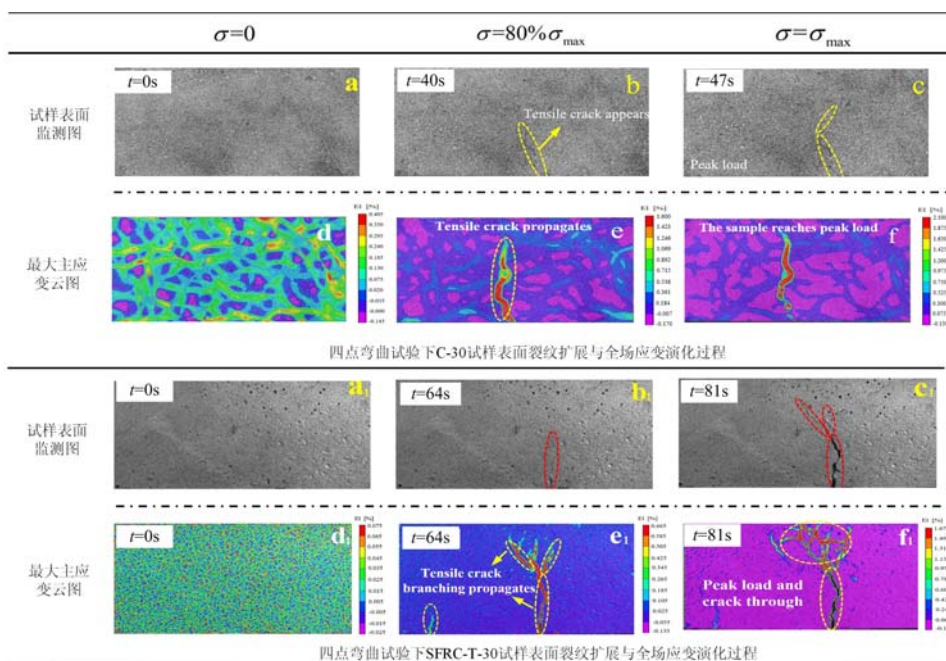


表4 四点弯曲试验中表面裂纹扩展与全场应变演化云图

Tab.4 Surface crack propagation and full-field major strain evolution under four-point bending test



根据拉压力学测试结果(表1)和试样表面应变监测云图(表2~表4)可知,随着钢纤维种类的增加,试样表面剥落量减少,混凝土强度得到增强,到达峰值荷载时最大主应变降低,内部固结后形成金属网结构的孔隙度不断降低,更为致密的金属网状结构良好地控制了微裂纹的衍生;相较于对照组,复掺钢纤维混凝土试样破坏断面粗糙,裂纹多以树枝状或网状衍生,伴随多条裂纹同时发育扩张。复掺钢纤维三掺配方(40kg/m³长纤维、5kg/m³中长纤维、10kg/m³短纤维)对抗拉、抗折强度、韧性、残余强度的提升效果最佳。由于云南会泽矿山竖井实际支护中井壁更易受拉应力而局部破坏,故选取三掺钢纤维混凝土配方作为矿山竖井衬砌支护的改进配方。

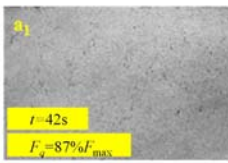
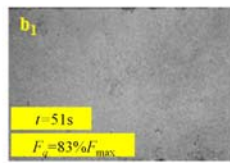
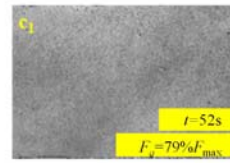
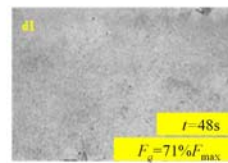
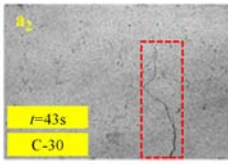
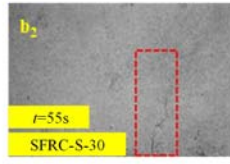
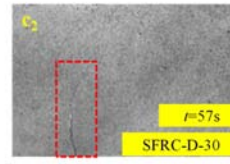
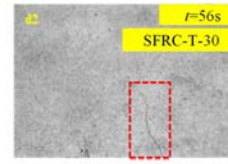


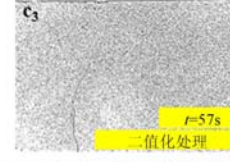

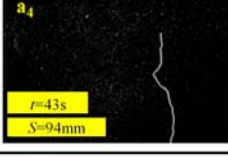
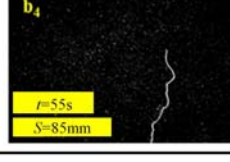
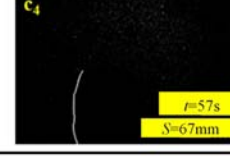
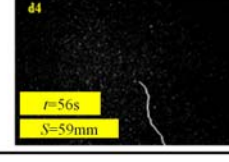
将支护三掺配方(40kg/m³长纤维、5kg/m³中长纤维、10kg/m³短纤维)应用于矿山竖井井壁衬砌支护之中,在此衬砌支护条件下,矿山竖井井壁剥落、钢筋裸露等情况得到明显改善,从而保障施工人员生命安全的同时也提高了施工进度和效率。

2.3 裂纹扩展特性

根据数字图像相关技术观测图像,选取32.5标号水泥下单掺、双掺、三掺钢纤维混凝土试样作为研究对象,开展试样裂纹扩展参数研究。选取试样到达起裂应力时的图像为对照组(表5中图a₁、图b₁、图c₁、图d₁)。

表5 钢纤维混凝土试样裂纹初始萌生与裂纹扩展

Tab. 5 Initial crack initiation stress and crack propagation of steel fiber reinforced concrete samples

	C-30	SFRC-S-30	SFRC-D-30	SFRC-T-30
起裂阶段	 t=42s F _a =87%F _{max}	 t=51s F _a =83%F _{max}	 t=52s F _a =79%F _{max}	 t=48s F _a =71%F _{max}
裂纹扩展阶段	 t=43s C-30	 t=55s SFRC-S-30	 t=57s SFRC-D-30	 t=56s SFRC-T-30
二值化图像	 t=43s 二值化处理	 t=55s 二值化处理	 t=57s 二值化处理	 t=56s 二值化处理
裂纹长度计算	 t=43s S=94mm	 t=55s S=85mm	 t=57s S=67mm	 t=56s S=59mm

由表5可知,随着钢纤维种类增多,试样相对起裂应力(起裂应力与峰值应力比值)下降,素混凝土试样(C30)相对起裂应力最大(87%F_{max})。分别选取C30、SFRC-S-30、SFRC-D-30、SFRC-T-30试样起裂后至裂纹扩展1s、4s、5s、8s时的图像作为研究对象,自试样开始起裂至裂纹沿着试样表面以细长曲线状延伸的过程见表5中图a₂、图b₂、图c₂、图d₂所示;将优选的裂纹扩展图像进行双边滤波、自适应Binarize处理后得到裂纹扩展的Binarize图像(表5中图a₃、图b₃、图c₃、图d₃);引入Sobel operator与闭运算对图像进一步处理,得到裂纹轨迹图(表5中图a₄、图b₄、图c₄、图d₄)和像素坐标,逐项求算裂纹像素欧氏距离得到裂纹轨迹长度^[18-19]。

根据不同钢纤维配方下试样表面裂纹扩展速度与相对起裂应力F_a(%F_{max})绘制不同钢纤维掺量下裂纹扩展参数图如图9所示:不添加钢纤维混凝土试样相对起裂应力最大(87%F_{max}),同时裂纹扩展

平均速度最快(94mm/s);随着钢纤维种类增多,裂纹扩展速度减缓;相对起裂应力依次下降,三掺钢纤维混凝土试样相对起裂应力最小(71% F_{max}),同时裂纹扩展平均速度最慢(7.38mm/s)。钢纤维试样内部交织形成三维金属锚网结构来抑制裂纹发育扩张,随着钢纤维种类增加,锚网结构更加紧实,孔隙度更低,同等外部荷载条件下,不同种类钢纤维间互相作用,可进一步抑制微裂纹衍生成宏观裂纹的进程,进而减缓裂纹扩展速度,增强了试样的弯拉强度与韧性。

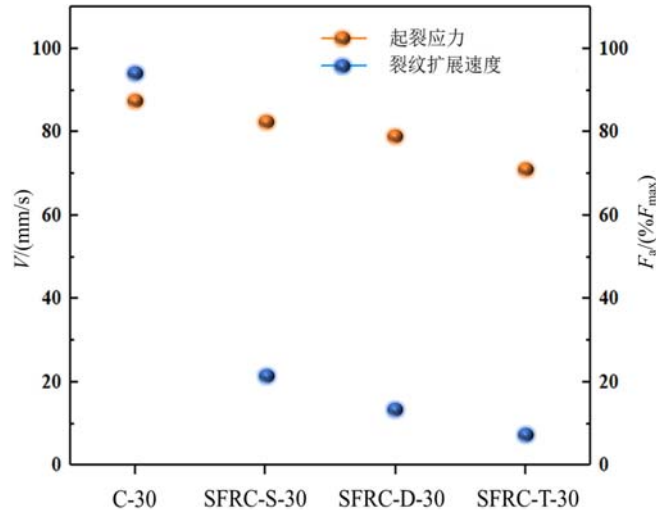


图9 钢纤维混凝土裂纹扩展参数对比图

Fig. 9 Comparison of crack propagation parameters of steel fiber reinforced concrete

3 结论

本文通过向混凝土内复掺钢纤维制成标准试样,进行单轴压缩、劈裂拉伸、四点弯曲试验,并利用DIC技术进行观测分析,探究了不同钢纤维组合配方对钢纤维混凝土力学性能和裂纹扩展的影响,主要结论如下:

(1) 相较于对照组,添加钢纤维后混凝土单轴抗压强度提升了4%~19%,抗拉强度提升了46%~83%,抗折强度提升了24%~39%。随着钢纤维种类的增加,试样位移-荷载峰后曲线斜率逐渐降低。三掺钢纤维(40kg/m³长纤维、5kg/m³中长纤维、10kg/m³短纤维)对混凝土抗拉、抗折强度提升最大。相较于单掺配方,三掺配方韧性提升效果最佳,韧性指数 I_5 提升了5.5%~17.4%, I_{10} 提升了6.7%~10.9%。优选三掺钢纤维配方作为矿山衬砌支护的最佳配方后,竖井井壁剥落、钢筋裸露等情况得到明显改善。

(2) 随着钢纤维种类的增加,试样到达峰值荷载时,试样表面衍生裂纹数量和剥落量明显减少,由于混凝土内部固结后形成金属网结构的孔隙度不断降低,试样表面完整性得到有效控制。随着钢纤维种类增加,试样到达峰值荷载时最大主应变降低。试样受力初始段会在端部形成应变集中带,接着衍生出细长裂纹不断扩展至试样破坏,相对于未添加纤维的试样,添加钢纤维后试样断面粗糙不平整;试样裂纹多以树枝状或网状衍生,伴随多条裂纹同时发育扩张。

(3) 随着钢纤维种类的增加,试样裂纹扩展平均速度减缓,相对起裂应力(起裂应力与峰值应力比值)有所下降;三掺钢纤维混凝土试样相对起裂应力最低(71% F_{max}),裂纹扩展平均速度最慢(7.38 mm/s),复掺配方应用于矿山竖井衬砌支护,能够延长支护对象的服务年限。

参考文献:

- [1] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1):1-13 (SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high performance concrete in engineering structures [J]. Journal of Civil Engineering, 2021, 54(1):1-13 (in Chinese))

- [2] Zhu X F, Lv D W. Application and research of high-strength steel fiber reinforced concrete in a project[J]. *Advanced Materials Reseach*, 2011, 261:436-440.
- [3] 孙伟, 钱红萍, 陈惠苏. 纤维混杂及其与膨胀剂复合对水泥基材料的物理性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(2):95-99 (SUN Wei, QIAN Hongping, CHEN Huisu. The effect of the combination of hybrid fibers and expansive agent on the physical properties of cementitious composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000, 28(2):95-99 (in Chinese))
- [4] 韩嵘, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 36(11):63-67 (HAN Rong, ZHAO Shunbo, QU Fulai. Experimental study on the tensile performance of steel fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2006, 36(11):63-67 (in Chinese))
- [5] 杜任远, 陈宝春, 沈秀将. 不同方法测试的超高性能混凝土抗拉强度[J]. *材料导报*, 2016(S2):483-486 (DU Renyuan, CHEN Baochun, SHEN Xiujiang. Tensile strength of UHPC by different testing methods [J]. *Materials Review*, 2016(S2):483-486 (in Chinese))
- [6] 苏捷, 秦红杰, 史才军, 等. 钢纤维再生混凝土抗折强度尺寸效应试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(7):160-167 (SU Jie, QIN Hongjie, SHI Caijun, et al. Experimental study on scale effect of flexural strength of steel fiber reinforced recycled concrete[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2021, 48(7):160-167 (in Chinese))
- [7] Kachouh N, El-Hassan H, El-Maaddawy T. Influence of steel fibers on the flexural performance of concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2021, 10(3):165-192.
- [8] 徐礼华, 梅国栋, 黄乐, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(7):35-45 (XU Lihua, MEI Guodong, HUANG Le, et al. Study on uniaxial tensile stress-strain relationship of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2014, 47(7):35-45 (in Chinese))
- [9] 郭东明, 左建平, 张慧. 高强混凝土裂纹扩展规律的 CT 观察[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(10):1607-1612 (GUO Dongming, ZUO Jianping, ZHANG Hui. Mechanics of crack propagation in high performance concrete and its fractal dimensions based on CT observation[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(10):1607-1612 (in Chinese))
- [10] 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料冲击特性的研究[J]. *力学学报*, 2006, 38(2):199-208 (NING Jianguo, SHANG Lin, SUN Yuanxiang. Investigation on impact behavior of concrete[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(2):199-208 (in Chinese))
- [11] 吴佰建, 李兆霞, 郭力. 模拟混凝土破坏过程的微裂纹模型及其应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5):1034-1038 (WU Baijian, LI Zhaoxia, GUO Li. Micro-crack model for concrete rupture modeling and its applications[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(5):1034-1038 (in Chinese))
- [12] 李地元, 万千荣, 朱泉企, 等. 不同加载方式下含预制裂隙岩石力学特性及破坏规律试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5):1025-1035 (LI Diyuan, WANG Qianrong, ZHU Quanqi, et al. Experimental study on mechanical properties and failure behaviour of fractured rocks under different loading methods[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(5):1025-1035 (in Chinese))
- [13] ASTM C 1018. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) [J]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials Press, 1997:544-551.
- [14] 贺晶晶, 师俊平, 王学志. 纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J]. *实验力学*, 2017, 32(1):113-122 (HE Jingjing, SHI Junping, WANG Xuezhi. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural toughness[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(1):113-122 (in Chinese))
- [15] 佟钰, 朱长军, 田鑫, 等. 碳纤维混凝土受弯断面的数字重构与断裂能计算[J]. *实验力学*, 2016, 31(2):269-276 (TONG Yu, ZHU Changjun, TIAN Xin, et al. Digital reconstruction of bent fracture surface and fracture energy calculation of carbon fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(2):269-276 (in Chinese))

- [16] 吕太洪. 基于 SHPB 的混凝土及钢筋混凝土冲击压缩力学行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018 (LÜ Taihong. Research on impact compression mechanical behavior of concrete and reinforced concrete based on SHPB [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (in Chinese))
- [17] Li D Y. Full local-field strain evolution and fracture behavior of precracked granite under coupled static and dynamic loads[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 8(12):25–40.
- [18] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1383–1388 (LIU Chun, WANG Baojun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(9):1383–1388 (in Chinese))
- [19] 张少军, 艾矫健, 李忠富, 等. 利用数字图像处理技术测量几何尺寸[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3):284–287 (ZHANG Shaojun, AI Jiaojian, LI Zhongfu, et al. Size measurement with digital image processing technology[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3):284–287 (in Chinese))

Experimental study on mechanical properties and crack propagation characteristics of steel fiber reinforced concrete

JIANG Jingtai¹, LI Diyuan¹, WANG Xiaodong², YU Yisong^{1,2}, WANG Yongbing³, FANG Xugang³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, Hunan, China; 3. Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing 655011, Yunnan, China)

Abstract: To explore the mechanical properties and crack propagation of concrete with different steel fiber contents, the samples of steel fiber reinforced concrete with different contents were prepared by using materials including sand, stone, and cement from Huize mine in Yunnan province. The flexural, tensile, and compressive strengths of the samples were tested by the four-point bending test, splitting tensile test, and uniaxial compression test. Recording and analysis of specimen failure processes and principal strain evolution with digital image correlation, the preferred steel fiber concrete contents were applied to mine shaft wall lining support. At the same time, the monitored images were subjected to morphological processing, and the crack trajectory length and propagation velocity were calculated. The test results showed that the tensile strength of concrete samples increased by 46%~83% and the flexural strength increased by 24%~39% after adding steel fibers compared to the control group. In the steel fiber concrete formulation, the three-incorporated steel fiber formula (40kg/m³ long fiber, 5kg/m³ medium long fiber, 10kg/m³ short fiber) had the best effect on improving the tensile and flexural strength of concrete. Compared with the formula with single doped steel fiber, the toughness index of the formula with triple doped steel fibers has the highest increase. With the increased of steel fiber types, the slope of the post-peak curve of the sample gradually decreased, the porosity of the metal mesh structure formed by the internal consolidation of the concrete was reduced, the surface spalling amount and the number of crack derivatives on the concrete sample decreased, and the major principal strain of the sample decreased when the peak load was reached; the average speed of crack propagation on the concrete surface slowed down, and the relative cracking stress value gradually decreased. Among them, the relative crack initiation stress of the triple mixed steel fiber concrete sample was the lowest (71% F_{max}) and the average crack propagation velocity was the slowest (7.38mm/s).

Keywords: steel fiber reinforced concrete; flexural strength; digital image correlation; crack propagation