文章编号:1674-2974(2024)09-0155-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024096

绿色高性能纤维混凝土力学性能试验研究

郑山锁[1,2],胡锦华[1†],张欣[1],杨丰[2],周林[3],阮升[1]
[1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 中国启源工程设计研究院有限公司,陕西 西安 710058;
3. 中节能(安康)环保能源有限公司,陕西 安康 725018]

摘 要:采用纤维素纤维和农业废料稻壳灰等材料制备了绿色高性能纤维混凝土.通过正交试验研究了纤维素纤维掺量、稻壳灰掺量和水胶比3种因素对混凝土强度、抗弯韧性、坍落度的影响规律与显著程度,并对稻壳灰和纤维素纤维的增强增韧机理进行了分析.结果表明:混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度随水胶比的增加显著降低,随稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量的增加而提高;混凝土的抗弯初裂强度和极限抗弯强度随稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量的增加逐渐增大;纤维素纤维不仅能够阻裂增韧,还可发挥“内养护作用”,在一定程度上提升混凝土的强度和抗弯韧性,稻壳灰在拌合物中发挥微集料填充效应和火山灰效应,亦可增强混凝土的力学性能.

关键词:纤维素纤维;稻壳灰;抗压强度;劈裂抗拉强度;抗弯韧性
中图分类号:TU375.4 **文献标志码**:A

Experimental Study on Mechanical Properties of Green High Performance Fiber Reinforced Concrete

ZHENG Shansuo[1,2], HU Jinhua[1†], ZHANG Xin[1], YANG Feng[2], ZHOU Lin[3], RUAN Sheng[1]
(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an 710058, China;
3. China Energy Conservation Group Ankang Environmental Protection Energy Co., Ltd., Ankang 725018, China)

Abstract: Green high performance fiber reinforced concrete was prepared using cellulose fiber, agricultural waste rice husk ash, and other materials. The effect of three factors, namely cellulose fiber admixture, rice husk ash admixture, and water-cement ratio, on the strength, flexural toughness, and slump of concrete were investigated by orthogonal tests, and the strengthening and toughening mechanism of rice husk ash and cellulose fiber was analyzed. The results showed that the compressive strength and splitting tensile strength of concrete decreased significantly with the increase of water-cement ratio and increased with the rice husk ash admixture and cellulose fiber admixture; the flexural initial crack strength and ultimate flexural strength of concrete increased gradually with the

* **收稿日期**:2023-10-07
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509302),National Key Research and Development Program of China(2019YFC1509302);陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLSF06-10),Shaanxi Province Key R&D Program Project (2021ZDLSF06-10);西安市科技计划项目(2019113813CXSF016SF026),Xi'an Science and Technology Plan Project(2019113813CXSF016SF026)
作者简介:郑山锁(1960—),男,陕西渭南人,西安建筑科技大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 1097477061@qq.com

rice husk ash admixture and cellulose fiber admixture; cellulose fiber can not only resist cracking and toughening but also play the role of "internal maintenance". The rice husk ash plays a micro-aggregate filling effect and volcanic ash effect in the concrete mix, which can also enhance the mechanical properties of concrete.

Key words: cellulose fiber; rice husk ash; compressive strength; split tensile strength; flexural toughness

1997年3月的"高强与高性能混凝土"会议上,吴中伟院士首次提出了"绿色高性能混凝土"的概念[1],成为我国高性能混凝土发展的一个里程碑.硅灰是高性能混凝土中常用的矿物掺合料,而现阶段我国硅灰产量较少,且价格较高,难以满足实际工程的大量需求.稻壳在适当条件下焚烧、研磨制成稻壳灰,其中含有90%~96%的SiO_2,经过研磨处理后的稻壳灰粒径较小,比表面积巨大,达到250 m^2/kg[2],能够发挥火山灰效应和微集料填充效应,其在改善混凝土内部结构方面具有与硅灰类似的作用[3-6].我国每年稻壳产量超过了4 000万t.将稻壳灰用于混凝土,不仅可以替代硅灰改善混凝土材料的致密性,提升其综合性能[7-11],而且能在一定程度上解决稻壳大量堆积侵占土地资源以及就地燃烧造成的空气污染等一系列环境问题[12].

高性能混凝土以及绿色高性能混凝土仍存在抗拉强度低、抗裂性差和脆性明显等不足[13-15],工程中通常采用掺加纤维的方式改善混凝土脆性.常见的聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维和钢纤维等对混凝土的工作性能影响较大,不宜用于粗骨料含量较多的混凝土中.而纤维素纤维不仅具有高抗拉强度,还具有良好的亲水性和分散性[16-17],其在硬化混凝土基体内呈三维空间乱向分布,可显著改善混凝土的孔隙结构[18-20],且纤维单丝独有的空腔结构使其具有吸收和储存水分的能力,可在一定程度上发挥"内养护作用",并阻止干缩过程中微裂纹的产生和扩展,有利于改善水泥基材料的干缩性能[17].Zubair[21]研究发现混凝土的工作性能随纤维体积掺量的增加明显降低,其抗压强度则逐渐提升;混凝土的抗弯和抗拉强度则随纤维掺量的增加呈先增加后减少的趋势.Buch等[22]研究表明,纤维素纤维可大幅度提高混凝土的抗压强度、抗冲击性能和弯曲韧性,显著改善其耐久性,并可减少混凝土塑性收缩开裂,抑制裂缝开展.而Banthia等[23]在研究中指出,当纤维素纤维掺量较低时,其对混凝土的韧性提升不显著.

鉴于稻壳灰和纤维素纤维的优异性能,以及目前高性能混凝土存在的不足,本文以现有高性能混凝土研究为基础,在混凝土常规组分之外,采用农业废料稻壳灰替代部分水泥,并掺加具有阻裂增韧作用的纤维素纤维,制备具有高强度、高耐久性、高韧性且绿色环保的高性能纤维混凝土.通过试验研究和微观机理分析,探究稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量对混凝土力学性能、工作性能的影响规律,对混凝土向绿色高性能方向发展具有重要的理论意义和应用价值.

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用P·O42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰为渭河发电有限公司生产的Ⅰ级粉煤灰;粗骨料为粒径在5~20 mm之间连续级配的石灰石碎石;细骨料为天然中粗河砂,细度模数为2.8;减水剂为聚羧酸系高性能混凝土外加剂,固含量为20%左右;纤维为UF500纤维素纤维,纤维的性能参数如表1所示;所用拌和水为生活饮用水.

表1 纤维素纤维的特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of cellulose fibers

长度/mm	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	比表面积/($cm^2\cdot g^{-1}$)	单丝直径/μm	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂延伸/%	耐酸碱性
2~3	1.1	25 000	15~20	800~1000	8~10	10	强

试验所用硅灰为S95微硅粉,所用稻壳灰是稻壳经过焚烧、研磨制得的粉体材料.未经研磨处理的稻壳灰为原灰,其微观结构呈交错网状的板片多孔结构(图1),且具有较大的比表面积,对原灰表面层

进行EDS能谱分析,结果如图2所示,表明其主要成分为SiO_2.稻壳灰和硅灰的化学组分检测结果如表2所示,可以看出其SiO_2含量(全文含量均为质量分数)与硅灰相近.观察图3可知,稻壳灰中SiO_2以无定形球状玻璃体存在,与硅灰相似,稻壳灰的细度明显更小,比表面积更大.且随研磨时间增加,稻壳灰网状结构逐渐消失,颗粒尺寸也逐渐减小并成为形状不规则的粉体颗粒,研磨20 min的粉体颗粒平均粒径在10 μm左右,比表面积在50 m^2/g以上.稻壳灰45 μm筛余量随研磨时间的变化规律如图4所示,呈现先显著降低后缓慢增加的规律,研磨时间为20 min时稻壳灰的细度最小,筛余量仅为6%,故本文采用经研磨20 min所制得的稻壳灰,并对其进行XRD图谱分析,如图5所示,表明稻壳灰中有较高含量的无定型SiO_2,使其在混凝土中能够发挥火山灰效应.

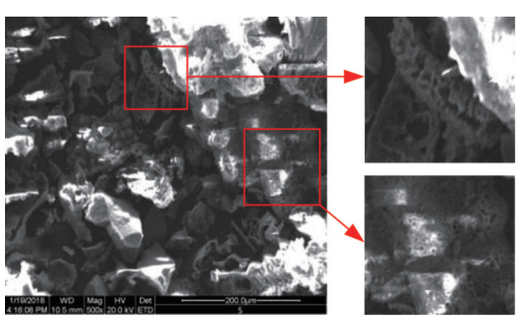


图1　原灰微观多孔结构SEM电镜图

Fig. 1　SEM micrographs of the microporous structure of initial rice husk ash

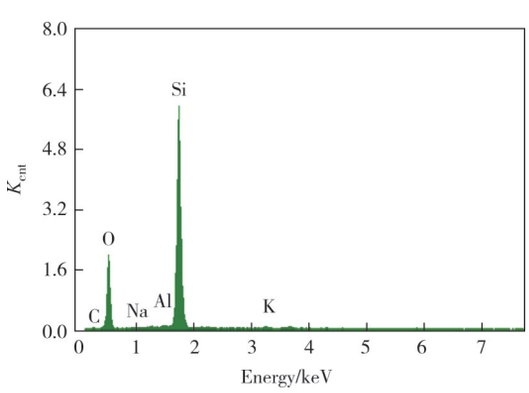
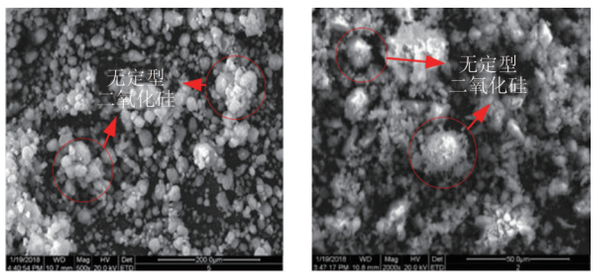


图2　定点1的能谱分析

Fig.2　Energy spectrum analysis of fixed point 1



(a) 硅灰500×　　(b) 研磨后稻壳灰2 000×

图3　硅灰、研磨后稻壳灰SEM电镜图

Fig. 3　SEM micrographs of silica fume and rice husk ash after grinding

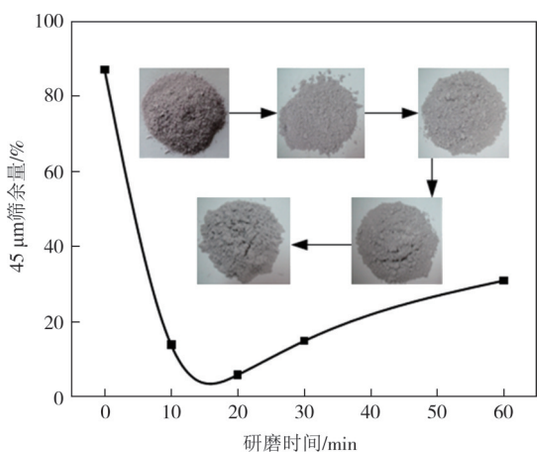


图4　稻壳灰45 μm筛余量随研磨时间变化

Fig. 4　The diagram of 45 μm sieve allowance of rice husk ash changes with grinding time

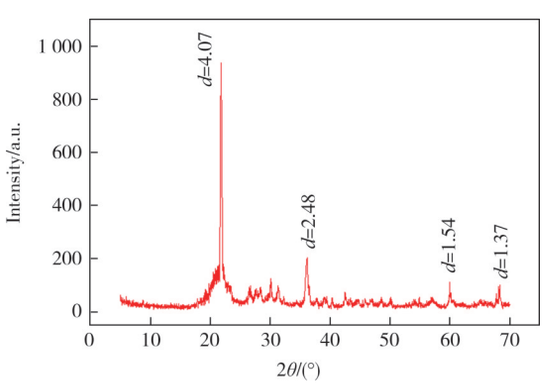


图5　稻壳灰的XRD图谱

Fig. 5　XRD atlas of rice husk ash

1.2　配合比设计

为揭示水胶比、稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量等

表2　稻壳灰和硅灰的化学组分(质量分数)

Tab.2　Chemical constituents of rice husk ash and silica fume(mass faction)

名称	质量分数/%								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	烧失量
稻壳灰	91.20	0.63	0.21	1.03	0.28	0.25	1.29	0.12	3.90
硅灰	95.67	0.23	<0.01	0.15	0.76	0.04	1.62	0.30	0.97

因素对混凝土工作性能和基本力学性能的影响规律和显著程度,本文将稻壳灰等量替代水泥,采用正交试验设计方法,考虑水胶比(A)、稻壳灰掺量(B)、纤维素纤维掺量(C)3种因素,每种因素取3个水平,设计了9组混凝土配合比,采用L9(3^4)的3因素3水平正交表,每组混凝土单方材料用量见表3.其中,砂率取40%,各材料用量为:碎石1 041 kg/m^3,砂700 kg/m^3,计算用水量175 kg/m^3(混凝土实际用水量为计算用水量减去减水剂引入的水量),粉煤灰掺量为胶凝材料总量的20%,减水剂掺量为胶凝材料用量的1%.

表3 3因素3水平正交表及单方混凝土材料用量

Tab.3 3 factors 3 horizontal orthogonal table and amount of materials used for single-side concrete

组号	因素			单方混凝土中材料用量/(kg·m^{-3})				
	A	B/%	C/(kg·m^{-3})	水泥	粉煤灰	稻壳灰	减水剂	纤维素纤维
S1	0.37	0	0.7	378	95	0	4.73	0.7
S2	0.37	10	1.1	331	95	47	4.73	1.1
S3	0.37	20	1.6	283	95	95	4.73	1.6
S4	0.41	0	1.1	342	85	0	4.27	1.6
S5	0.41	10	1.6	299	85	43	4.27	0.7
S6	0.41	20	0.7	257	85	85	4.27	1.1
S7	0.45	0	1.6	311	78	0	3.89	1.1
S8	0.45	10	0.7	272	78	39	3.89	1.6
S9	0.45	20	1.1	233	78	78	3.89	0.7

注:硅灰对比组S5-SF、S8-SF材料用量如文字所述,不在表内列出;稻壳灰掺量(B)所占百分比以水泥为基准.

此外,为了研究稻壳灰替代硅灰对混凝土抗压性能的影响,同时设置两组对照试验,其混凝土配合比分别为:

1)S5-SF.单方混凝土中硅灰用量为43 kg/m^3,稻壳灰用量为0,其余组分种类及用量与S5相同.

2)S8-SF.单方混凝土中硅灰用量为39 kg/m^3,稻壳灰用量为0,其余组分种类及用量与S8相同.

1.3 试验方法

1)拌和方法.考虑到纤维素纤维单丝在混凝土中分散的均匀性和分布的乱向性,为避免纤维黏聚成团,本试验采用"先干后湿"的投料搅拌顺序,搅拌流程见图6.将混凝土拌合料装模、振实、表面抹平,成型并静置24 h后拆模,在温度为(20±3) ℃的饱和石灰水中养护至设定龄期.

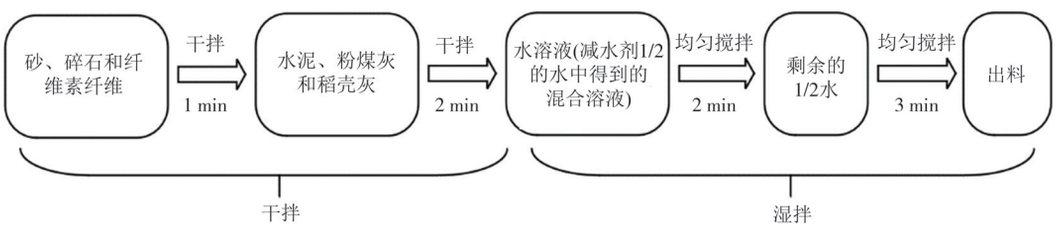


图6 高性能纤维混凝土搅拌工艺

Fig.6 High performance fiber reinforced concrete mixing process

2)测试方法.立方体抗压强度和劈裂抗拉强度测试依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行,试件尺寸均为150 mm×150 mm×150 mm,采用TYA-2000型电液式压力试验机对试件连续均匀地施加荷载,分别测试3 d、7 d和28 d龄期的抗压强度和劈裂抗拉强度,立方体抗压强度试验见图7(a),劈裂抗拉强度试验见图7(b);弯曲韧性试验依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)进行,试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,采用DNS300电子万能试验机对试块进行测试,并在试件跨中安装测量挠度的位移计,抗弯强度试验见图7(c).最后将立方体试块从中间部位切片,采用扫描电子显微镜观察混凝土的微观形态.试验中每组制作3个相同配合比试件并取平均值以减少误差.

2 结果与分析

2.1 工作性能

流动性是影响混凝土拌合物工作性能的重要因素,本文采用坍落度对其进行表征,试验结果如表4



(a)抗压强度试验　(b)劈裂抗拉强度试验　(c)抗弯强度试验

图 7　高性能纤维混凝土强度试验

Fig.7　Strength test of high performance fiber reinforced concrete

所示.由图 8 可知,坍落度随水胶比的增加而显著提高,这是因为在骨料用量和用水量固定的情况下,随水胶比增大,浆体自身流动性增加,故拌合物的流动性亦随之变大;坍落度随稻壳灰掺量的增加而明显减小,由表 4 可知,S5 和 S5-SF、S8 和 S8-SF 对比坍落度分别下降了 3.3% 和 7.9%,说明用稻壳灰比用硅灰等量替代水泥作为掺合料对混凝土坍落度的降低作用更为显著.这是因为稻壳灰的超细粒径及多孔结构使其具有巨大的比表面积,颗粒表面不仅能够吸附大量水分,其多孔结构还会储存部分自由水,在一定程度上影响拌合物的工作性能;纤维素纤维也会降低混凝土的流动性,但因其具有良好的亲水性,故对流动性影响不大.

表 4　高性能纤维混凝土的坍落度

Tab.4　Slump value of high performance fiber reinforced concrete　　**mm**

S1	S2	S3	S4	S5	S5-SF	S6	S7	S8	S8-SF	S9
150	145	130	160	145	150	140	180	175	190	150

2.2　力学性能

试验结果如表 5 所示.依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009),采用弯曲韧性指数对高性能纤维混凝土的抗弯性能进行评价.同时为了探讨水胶比、稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量等因素对混凝土抗压强度、劈裂强度和弯曲韧性的影响规律和影响显著程度,对试验结果进行极差和方差分析,分析结果见表 6 和表 7.

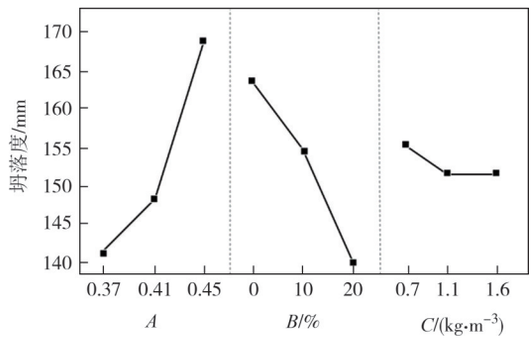


图 8　坍落度的主效应图

Fig.8　Main effect diagram of slump

表 5　高性能纤维混凝土强度试验结果

Tab.5　Strength test results of high performance fiber reinforced concrete　　**MPa**

编号	抗压强度			28 d劈裂抗拉强度	28 d抗弯初裂强度	28 d极限抗弯强度
	3 d	7 d	28 d			
S1	27.6	39.8	55.3	4.0	5.0	5.5
S2	37.3	49.9	63.2	4.3	5.2	6.3
S3	38.6	51.3	67.6	4.8	5.8	6.8
S4	26.8	36.7	49.6	4.1	4.4	5.2
S5	30.9	40.5	55.0	4.5	4.7	6.0
S6	31.2	41.0	56.2	4.2	4.8	5.3
S7	22.7	31.9	46.9	4.3	4.0	4.9
S8	28.2	34.8	47.4	3.6	4.0	4.5
S9	28.0	36.9	52.7	3.9	4.3	5.2

注:S5-SF 和 S8-SF 的 28 d抗压强度分别为 57.8 MPa 和 50.4 MPa.

表 6　极差分析结果

Tab.6　Range analysis results　　**MPa**

极差来源	抗压强度			劈裂抗拉强度			抗弯初裂强度			极限抗弯强度		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
K_1	62.0	50.6	53.0	4.4	4.1	3.9	5.3	4.2	4.6	6.2	5.2	5.1
K_2	53.6	55.2	55.2	4.3	4.1	4.1	4.6	4.6	4.6	5.5	5.6	5.6
K_3	49.0	58.8	56.5	3.9	4.3	4.5	4.1	5.0	4.8	4.9	5.8	5.9
R_j	13.0	8.3	3.5	0.5	0.2	0.6	1.2	0.8	0.2	1.3	0.6	0.8
排序	$R_A>R_B>R_C$			$R_C>R_A>R_B$			$R_A>R_B>R_C$			$R_A>R_C>R_B$		

2.2.1　立方体抗压强度

试件受压破坏形态如图 9 所示.掺加纤维素纤维之后的混凝土首先在试件中部出现多条竖向裂缝,然后逐渐斜着向上下两个方向延伸,形成较大的竖向和斜向裂缝,最终导致试件破坏.纤维素纤维掺量为 0.7 kg/m³ 的混凝土试件,其破坏形态与普通混凝土相似,出现了贯穿全截面的斜向裂缝.随纤维掺量的增加,混凝土试件细小裂缝的数量呈减小趋势,说明纤维素纤维具有阻止裂缝发展的作用.S5-SF 和 S8-SF 试件的立方体抗压强度分别为 57.8

表7 方差分析结果

Tab.7 Results of variance analysis

指标		统计参数					是否显著	贡献率/%
		自由度	平方和	均方差	*F*值	*P*值		
抗压强度	*A*	2	262.149	131.075	144.39	0.007	是	68.3
	B	2	102.148	51.074	56.26	0.017	是	26.6
	C	2	19.102	9.551	10.52	0.087	否	5.1
	误差	2	1.816	0.908	—	—	—	—
劈裂抗拉强度	*A*	2	0.287	0.144	20.30	0.047	是	31.9
	B	2	0.037	0.019	2.64	0.274	否	4.1
	C	2	0.576	0.288	40.72	0.024	是	64.0
	误差	2	0.014	0.007	—	—	—	—
抗弯初裂强度	*A*	2	2.425	1.213	649.49	0.002	是	81.3
	B	2	0.432	0.216	115.65	0.009	是	14.4
	C	2	0.125	0.062	33.37	0.029	是	0.04
	误差	2	0.004	0.002	—	—	—	—
极限抗弯强度	*A*	2	2.649	1.325	199.41	0.005	是	62.9
	B	2	0.533	0.267	40.08	0.024	是	12.6
	C	2	1.030	0.515	77.46	0.013	是	24.5
	误差	2	0.013	0.007	—	—	—	—



图9 试件受压破坏形态

Fig. 9 Failure mode of specimen under compression

MPa、50.4 MPa,可知在其他材料用量相同的情况下,掺加稻壳灰和硅灰的混凝土强度差值较小,表明稻壳灰在混凝土中能够发挥与硅灰近似的增强作用.

由表6可知,水胶比对抗压强度影响最大,极差R_j为13.0 MPa;稻壳灰掺量影响程度次之,极差为8.3 MPa;纤维素纤维掺量影响程度最低,极差为3.5 MPa.

由图10可知,高性能纤维混凝土的抗压强度随水胶比的增加而显著降低,这是因为当用水量不变、胶凝材料用量减少时,硬化浆体中水化硅酸钙(C—S—H)凝胶的生成量也会减少,其因游离水蒸发留下的孔隙数量亦相应增加,致使混凝土内部致密性相对降低;随稻壳灰掺量的增加,抗压强度逐渐提升,稻壳灰掺量从0提升到20%时,抗压强度提高了16.4%;纤维素纤维在一定程度上亦能够提升混凝土的抗压强度,当纤维素纤维掺量由0.7 kg/m^{3}增至1.6 kg/m^{3}时,混凝土抗压强度提升6.7%.稻壳灰中活性SiO_2含量较高,能够发挥微集料填充效应和火山灰效应,稻壳灰能与强度较低的$Ca(OH)_2$晶体反应生成强度更高的C—S—H胶体,改善混凝土的抗压性能[19].此外,粉煤灰会降低混凝土整体的水化速率,但添加活性稻壳灰能提高混凝土早期强度,从而减弱粉煤灰对混凝土水化速率的影响.纤维素纤维对混凝土抗压强度的影响较小,由于其具有独特的空腔结构和天然的亲水性能,当掺量适当时,可发挥“内养护作用”,能够在胶凝材料水化早期吸收并储存部分自由水,并在水化后期将其逐渐释放[16],为稻壳灰、粉煤灰与水泥水化产物反应生成二次水化产物的过程提供水分,促进胶凝材料进一步水化,改善硬化浆体的

内部孔结构,提高混凝土的抗压强度.

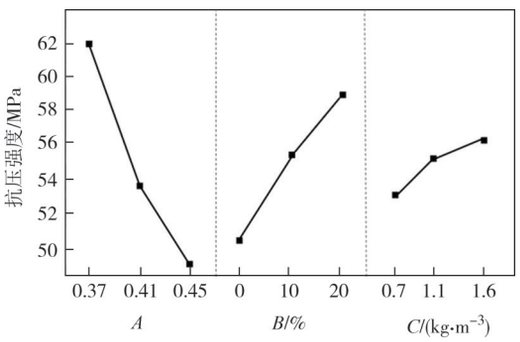


图 10　抗压强度主效应图

Fig. 10　Main effect diagram of compressive strength

由表 7 可知,各因素对高性能纤维混凝土抗压强度贡献率由大到小依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量,与极差分析结果一致.水胶比和稻壳灰掺量的 P 值均小于 0.05,故认为这两种因素对高性能纤维混凝土抗压强度的影响显著.且稻壳灰掺量与水胶比对抗压强度的贡献率分别达到了 26.6% 和 68.3%,表明水胶比是影响抗压强度的最主要因素.而纤维素纤维掺量的 P 值大于 0.05,对试验结果的贡献率仅为 5.1%,影响不显著.

2.2.2　劈裂抗拉强度

由表 6 可知,纤维素纤维掺量对劈裂抗拉强度影响最大,极差为 0.6 MPa;水胶比影响程度次之,极差为 0.5 MPa;稻壳灰掺量影响程度最低,极差为 0.2 MPa.

由图 11 可知,纤维素纤维掺量和水胶比对高性能纤维混凝土的劈裂抗拉强度均有较大影响.随着水胶比的减小,高性能纤维混凝土的劈裂抗拉强度提高,当水胶比从 0.45 降至 0.41 时,劈裂抗拉强度增幅较大;当水胶比从 0.41 降至 0.37 时,劈裂抗拉强度增幅变缓.随着纤维素纤维掺量的增加,劈裂抗拉强度得到显著提高,均匀分散的纤维素纤维在混凝土中呈现三维网状结构,能够有效阻止混凝土中微裂纹的开展,具有较好的抗裂增韧效果,当纤维素纤维掺量由 0.7 kg/m^3 增至 1.6 kg/m^3 时,混凝土劈裂抗拉强度提升约 15.0%.在三种因素中,稻壳灰掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响最小,劈裂抗拉强度值随稻壳灰掺量的增加而缓慢提升.

由表 7 可知.水胶比和纤维素纤维掺量对高性能纤维混凝土的劈裂抗拉强度影响显著,水胶比对试验结果的贡献率为 31.9%,纤维素纤维掺量的贡献率达到 64.0%,而稻壳灰掺量对劈裂抗拉强度影响较小,对试验结果的贡献率仅为 4.1%.故 3 种因素对高性能纤维混凝土劈裂抗拉强度的影响显著程度依次为:纤维素纤维掺量>水胶比>稻壳灰掺量,与极差分析分析结果一致.

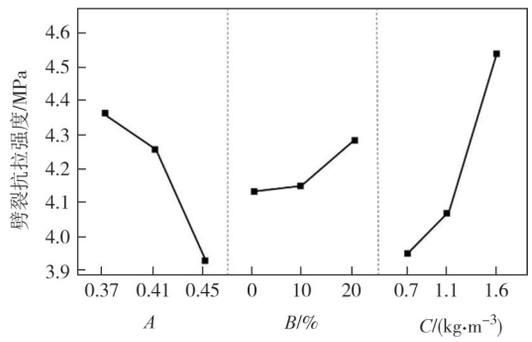


图 11　劈裂抗拉强度主效应图

Fig.11　Main effect diagram of splitting tensile strength

2.2.3　抗弯强度与弯曲韧性

S1~S9 组混凝土抗弯试验所得荷载-挠度曲线如图 12 所示.试件在水胶比一定的情况下,S1~S3 随稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量共同增加,混凝土极限抗弯强度和其对应的挠度亦不断增长;在试件 S4~S6 中,S6 比 S4 极限抗弯强度略大,但其极限抗弯强度对应的挠度更小,S5 比 S4 极限抗弯强度处的挠度略小,但极限抗弯强度最大;而试件 S7~S9 中,S9 的极限抗弯强度最大,其极限抗弯强度处的挠度比 S8 略小,S7 的极限抗弯强度最小,但其极限抗弯强度处的挠度最大.这说明纤维素纤维和稻壳灰均会增强混凝土极限抗弯强度和弯曲韧性,但纤维素纤维的增强效果大于稻壳灰.

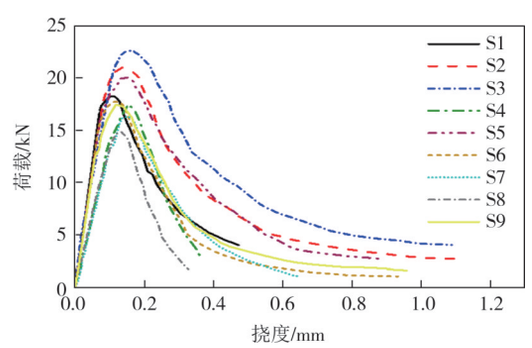


图 12　S1~S9 组混凝土的荷载-挠度曲线

Fig.12　Load-deflection curves of concrete of S1~S9 group

1)　抗弯强度

由表 6 可知,水胶比对抗弯初裂强度影响最大,极差为 1.2 MPa;稻壳灰掺量影响程度次之,极差为 0.8 MPa;纤维素纤维掺量影响程度最低,极差为 0.2 MPa.由图 13 可知,抗弯初裂强度随水胶比的降低而显著增加,稻壳灰和纤维素纤维亦能够有效提高抗

弯初裂强度.水胶比对极限抗弯强度影响最大,极差为1.3 MPa;纤维素纤维掺量影响程度次之,极差为0.8 MPa;稻壳灰掺量影响程度最低,极差为0.6 MPa.由图14可知,极限抗弯强度随水胶比的增加逐渐减小,随稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量的增加明显提升.

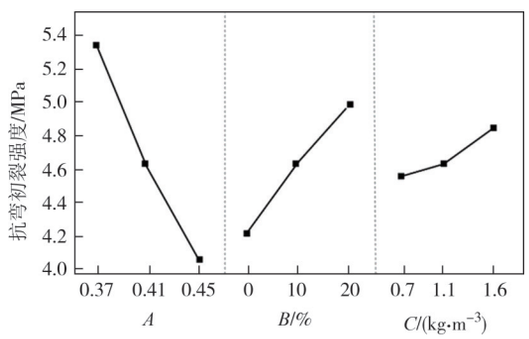


图13 抗弯初裂强度主效应图

Fig. 13 Main effect diagram of flexural initial crack strength

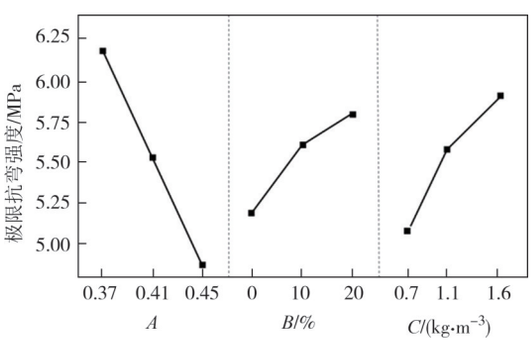


图14 极限抗弯强度主效应图

Fig. 14 Main effect diagram of ultimate flexural strength

由图13和图14可以看出,纤维素纤维对混凝土抗弯初裂强度和极限抗弯强度的影响程度差异较大,这是由于混凝土的抗弯初裂强度主要取决于混凝土基体的密实程度,水胶比减小与稻壳灰掺量增加,都提高了混凝土的密实性,从而提高了混凝土的抗弯初裂强度,纤维素纤维仅发挥其内养护作用,为混凝土的抗弯初裂强度提高作出贡献.当混凝土出现裂缝时,混凝土中乱向分布的纤维素纤维开始发挥作用,连接裂缝两端的混凝土基体,产生桥联作用,抑制裂缝进一步发展,对混凝土极限抗弯强度的提高起到重要作用.

由表7的方差分析可知,3种因素对高性能纤维混凝土抗弯初裂强度影响的显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量,与极差分析结果一致;水胶比、稻壳灰掺量对高性能纤维混凝土抗弯初裂强度的贡献率依次为81.3%、14.4%,而纤维素纤维掺量的贡献率仅为0.04%,说明水胶比是影响抗弯初裂强度的决定性因素.与其他两种因素相比,纤维素纤维的影响基本可以忽略不计.

通过方差分析结果可以得出,对于极限抗弯强度而言,各因素的影响显著程度依次为:水胶比>纤维素纤维掺量>稻壳灰掺量,其中水胶比对高性能纤维混凝土极限抗弯强度的贡献率达到62.9%,纤维素纤维掺量的贡献率为24.5%,稻壳灰掺量对极限抗弯强度的贡献率为12.6%.与极限抗弯强度试验极差分析结果相似,水胶比亦是高性能纤维混凝土极限抗弯强度的最主要影响因素.

2) 弯曲韧性

弯曲韧性用于考察内掺纤维材料对混凝土开裂后的增韧效果,而弯曲韧性指数是评价混凝土抗弯性能的重要指标.其值越大,表明试件抵抗弯曲变形能力越强.S1~S9组试件的弯曲韧性指数(I_5、I_{10}和I_{20})如图15所示.由于部分试件在试验过程中未达到5.5倍和10.5倍初裂挠度,故其弯曲韧性指数I_{10}和I_{20}无法给出.依据试验结果,得到高性能纤维混凝土弯曲韧性指数I_5的主效应图,如图16所示.可见,水胶比、稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量对混凝土的弯曲韧性均有较大程度的影响,高性能纤维混凝土的弯曲韧性指数I_5随水胶比的增大而逐渐减小,随稻壳灰和纤维素纤维掺量的增加而明显增加.

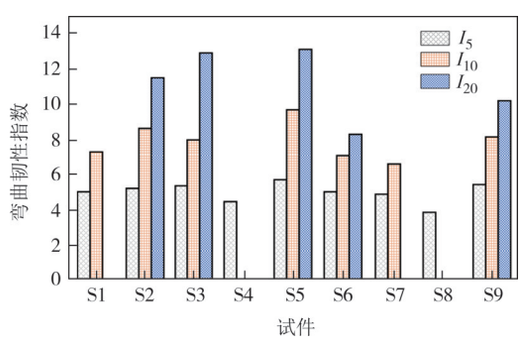


图15 弯曲韧性指数

Fig.15 Bending toughness index

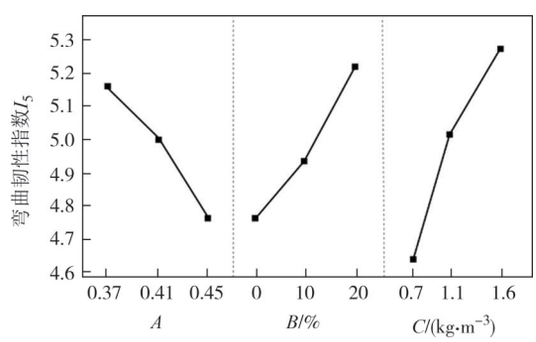


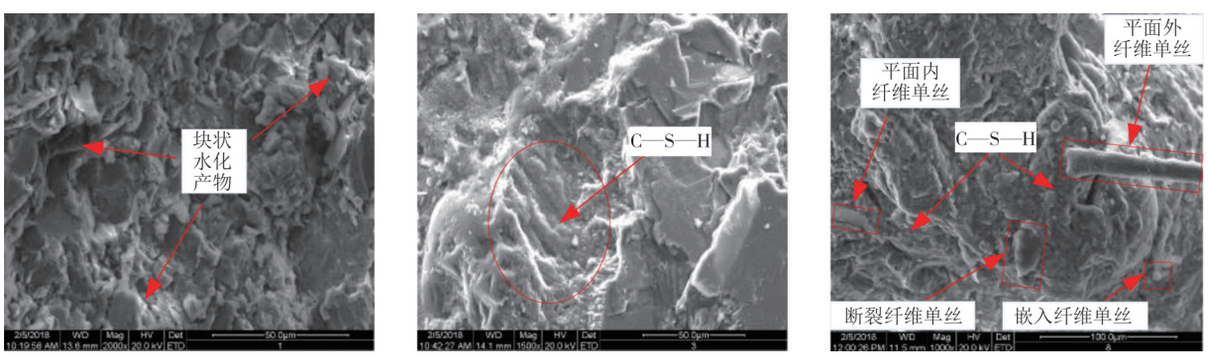
图16 弯曲韧性指数I_5的主效应图

Fig. 16 Main effect diagram of bending toughness index I_5

2.3　微观形态及增强机理

本试验采用Quanta200扫描电子显微镜观察混凝土的微观形态,研究稻壳灰和纤维素纤维对混凝土微观结构的影响,以及水泥基体与纤维和骨料的界面情况.

S1和S3组混凝土试件的SEM扫描电镜图片如图17所示.图17(a)和图17(b)分别为S1组(稻壳灰掺量为0,纤维素纤维掺量为0.7 kg/m^3)和S3组(稻壳灰掺量为20%,纤维素纤维掺量为1.6 kg/m^3)混凝土的微观形貌.可见S1组混凝土内部结构相对密实,少见未水化胶凝材料颗粒,水化产物呈紧密层叠的块状分布,而S3组试件的各种水化产物凝胶体之间黏聚成为更加致密的水泥石结构,且其骨料-硬化浆体界面过渡区未见明显的缺陷和取向性明显的层状分布晶体.这是由于稻壳灰颗粒与胶凝材料水化过程中形成的板块形$Ca(OH)_2$晶体发生化合反应,生成粒径更小、强度更高的C—S—H胶体[19],大幅度减少混凝土内部的有害孔数量,提高了硬化浆体及其与骨料界面的致密性.由于纤维素纤维优化了混凝土的孔隙结构,会降低外部侵蚀性介质向混凝土内部传输的速率,对混凝土的耐久性能也有一定提升[18].



(a)S1的SEM图　　(b)S3的SEM图　　(c)纤维素纤维的分布

图17　混凝土的SEM扫描电镜图

Fig.17　SEM micrographs of concrete

郭丽萍等[18]和张文潇[19]借助紫外线LED光源和透反射偏光显微镜通过CCD对试件进行拍照,获取了纤维素纤维在混凝土基体中的分布图像,发现了纤维素纤维在混凝土中呈均匀乱向分布的特点,但其图像并不能直观反映出纤维素纤维在混凝土基体中的空间分布特征.本文采用SEM技术得到纤维素纤维在混凝土基体中的微观形态及其分布情况,如图17(c)所示.从图中可见,平面内纤维单丝和平面外纤维单丝在混凝土基体中纵横交错呈空间乱向分布.这将有效降低微裂缝尖端的应力集中,抑制微裂纹的扩展,在一定程度上提高了混凝土材料的抗裂性能.当混凝土在荷载作用下产生开裂,纤维单丝还可承受拉应力,通过纤维单丝拔出或拉断耗散能量,避免混凝土材料发生明显的脆性破坏,将在一定程度上提高其变形能力,改善混凝土材料的韧性,从而提高其劈裂抗拉强度.同时,纤维素纤维周围被凝胶体紧密包裹,纤维与混凝土基体间界面过渡区亦较为密实.这是由于纤维素纤维独特的空腔结构能够发挥“内养护作用”,在胶凝材料水化早期吸收了浆体中的自由水,并在胶凝材料水化过程中缓慢释放,促进其水化进程,在纤维周围生成较多的凝胶体,不仅提高了纤维与混凝土基体之间的黏结性能,更好地发挥其增韧阻裂能力,还可提高硬化浆体的致密度,改善混凝土的综合性能.

3　结 论

1)稻壳灰表面层主要由SiO_2组成,中间夹层呈交错网状的板片多孔结构,具有较大的比表面积.稻壳灰45 μm筛余量随研磨时间的增加而先减小后增加,研磨时间为20 min时稻壳灰的细度最小,为形状不规则、粒径在10 μm左右的粉体颗粒.

2)S5和S5-SF、S8和S8-SF对比坍落度分别下降了3.3%和7.9%,说明用稻壳灰比用硅灰等量替代水泥作为掺合料对混凝土坍落度的降低作用更为显著.掺加稻壳灰和纤维素纤维均会降低混凝土的工作性能,但稻壳灰对混凝土工作性能的影响较大,而掺加纤维素纤维对混凝土工作性能的影响较小.

3)稻壳灰和纤维素纤维均可提高混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度.水胶比、稻壳灰掺量和纤维素

纤维掺量对抗压强度影响的贡献率分别为68.3%、26.6%及5.1%,分析结果表明3种因素对混凝土抗压强度的影响显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量;水胶比和纤维素纤维掺量对劈裂抗拉强度影响的贡献率分别为31.9%和64.0%,而稻壳灰掺量对试验结果的贡献率仅为4.1%.纤维素纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响最大,水胶比次之,稻壳灰掺量的影响最小.

4)弯曲韧性试验表明,混凝土的抗弯初裂强度和极限抗弯强度随稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量的增加逐渐增大.纤维素纤维和稻壳灰有利于改善混凝土的抗弯韧性,提高其变形能力,但稻壳灰对混凝土的变形能力影响相对较小.

5)纤维素纤维不仅能够阻裂增韧,还可发挥"内养护作用",在一定程度上提升混凝土的强度和抗弯韧性,提高混凝土变形性能,稻壳灰在拌合物中发挥微集料填充效应和火山灰效应,亦可增强混凝土的力学性能.

参考文献

[1] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新[J]. 建筑材料学报,1998,1(1):1-7.
WU Z W. Green high performance concrete and scientific and technological innovation[J]. Journal of Building Materials,1998,1(1):1-7.(in Chinese)

[2] 叶光,VT NGUYEN. 稻壳灰抑制超高性能混凝土的自收缩机理分析[J]. 硅酸盐学报,2012,40(2):212-216.
YE G, VT NGUYEN. Mitigation of autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete by rice husk ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2012,40(2):212-216.(in Chinese)

[3] HOSSAIN M M,KARIM M R,HOSSAIN M K,et al. Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: a review [J]. Construction and Building Materials, 2015,93:95-109.

[4] ZAREEI S A,AMERI F,DOROSTKAR F,et al. Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: evaluating durability and mechanical properties[J]. Case Studies in Construction Materials,2017,7:73-81.

[5] VISHWAKARMA V,RAMACHANDRAN D,ANBARASAN N,et al. Studies of rice husk ash nanoparticles on the mechanical and microstructural properties of the concrete[J]. Materials Today: Proceedings,2016,3(6):1999-2007.

[6] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: part I. raw materials and mixture design [J]. Construction and Building Materials,2015,101:741-751.

[7] 刘离. 电厂稻壳灰及其在混凝土中的应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
LIU L. Study on the rice husk ash from the power plants and its application in concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2012.(in Chinese)

[8] 汪知文,李碧雄. 稻壳灰应用于水泥混凝土的研究进展[J]. 材料导报,2020,34(9):9003-9011.
WANG Z W, LI B X. Research progress on application of rice husk ash in cement and concrete [J]. Materials Reports, 2020, 34(9):9003-9011.(in Chinese)

[9] NDUKA D O, OLAWUYI B J, FAGBENLE O I, et al. Assessment of the durability dynamics of high-performance concrete blended with a fibrous rice husk ash[J]. Crystals,2022,12(1):75.

[10] 王维红. 稻壳灰混凝土性能及机理研究[D]. 银川: 宁夏大学,2017.
WANG W H. Study on performance and mechanism of concrete with rice husk ash [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese)

[11] SREEKUMARAN S, MOHAN K S R. Low-velocity impact resistance of reactive powder concrete modified using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash[J]. Construction and Building Materials,2022,341:127891.

[12] KHAN R, JABBAR A, AHMAD I, et al. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete [J]. Construction and Building Materials,2012,30:360-365.

[13] 沈荣熹,王璋水,崔玉忠. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
SHEN R X, WANG Z S, CUI Y Z. Fiber reinforced cement and fiber reinforced concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.(in Chinese)

[14] 谢喆敏,李志刚,芦敬迪,等. 绿色混凝土的研究现状及发展建议[J]. 再生资源与循环经济,2019,12(2):36-39.
XIE Z M, LI Z G, LU J D, et al. Research on green concrete and suggestions [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2019,12(2):36-39.(in Chinese)

[15] 刘海波,殷付通,杨易鹏,等. 绿色混凝土的发展与应用[J]. 科技创新与应用,2020(27):176-177.
LIU H B, YIN F T, YANG Y P, et al. Development and application of green concrete [J]. Technology Innovation and Application,2020(27):176-177.(in Chinese)

[16] RAPOPORT J R. Cast-in-place cellulose fiber-reinforced cement paste, mortar, and concrete [J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(5): 299-306..

[17] KAWASHIMA S, SHAH S P. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 201-208.

[18] 郭丽萍, 张文潇, 孙伟, 等. 隧道用纤维素纤维混凝土在弯拉荷载作用下的耐久性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(3):612-618.
GUO L P, ZHANG W X, SUN W, et al. Durability of cellulose fiber reinforced concrete under bending load in tunnel engineering [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016,46(3):612-618.(in Chinese)

[19] 张文潇. 纤维素纤维混凝土耐久性、高温抗爆裂及徐变特性[D]. 南京:东南大学,2015.
ZHANG W X. Durability, resistance to spalling after high temperature and creep characteristics of cellulose fibre reinforced concrete[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.(in Chinese)

[20] 陶友海. 纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律[J]. 科学技术与工程,2022,22(2):715-720.
TAO Y H. Deterioration law of frost resistance durability of cellulose fiber reinforced concrete[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(2):715-720.(in Chinese)

[21] ZUBAIR N. Effects of micro cellulose fibers addition on concrete mechanical properties under flexure and uniaxial tension [D]. Victoria: University of Victoria, 2017.

[22] BUCH N, REHMAN O M, HILLER J E. Impact of processed cellulose fibers on Portland cement concrete properties [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,1999,1668(1):72-80.

[23] BANTHIA N, MAJDZADEH F, WU J, et al. Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear[J]. Cement and Concrete Composites,2014, 48: 91-97.