

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.051



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 稻草纤维增强泡沫混凝土物理力学性能试验研究

王秀丽, 潘旭宾, 吴征

(兰州理工大学土木工程学院; 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

**摘要:** 为了研究稻草纤维增强泡沫混凝土的性能, 以普通硅酸盐水泥为主要胶凝材料, 硅灰、偏高岭土和粉煤灰为辅助胶凝材料, 稻草纤维为增强材料, 采用物理发泡法制备纤维增强泡沫混凝土; 通过全因子试验, 研究在不同水胶比和发泡剂掺量下, 稻草纤维掺量对泡沫混凝土的密度、吸水率、抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度和抗冻性能的影响。结果表明: 对于不同水胶比和发泡剂掺量, 泡沫混凝土的密度、抗压强度和劈裂抗拉强度均随纤维掺量的增加呈现出先增加后降低的变化规律; 抗压强度随密度增加呈幂函数增加关系; 劈裂抗拉强度随抗压强度的增加呈指数函数增加关系; 当水胶比为 0.45 时, 抗折强度随纤维掺量的增加先增加后降低, 当水胶比为 0.50 时, 抗折强度随纤维掺量的增加而增加; 纤维的掺入增大了泡沫混凝土的泡孔尺寸和吸水率, 降低了其抗冻性能。

**关键词:** 稻草纤维; 泡沫混凝土; 泡孔尺寸; 力学性能; 抗冻性能

**中图分类号:** TU528.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0189-09

## Experimental study on the physical and mechanical properties of straw fiber reinforced foam concrete

WANG Xiuli, PAN Xubin, WU Zheng

(School of Civil Engineering; Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the properties of straw fiber reinforced foam concrete, fiber-reinforced foam concrete was prepared by the physical foaming method with ordinary Portland cement as the main cementitious material, silica fume, metakaolin and fly ash as the supplementary cementitious materials, and rice straw fiber as reinforcement material. The effects of straw fiber content on the density, water absorption, compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength and frost resistance of foam concrete were investigated by full factorial tests at different water-to-binder ratios and foaming agent dosages. The results showed that the density, compressive strength and splitting tensile strength of straw fiber reinforced foam concrete increased first and then decreased with the increase of fiber content for different water-to-binder ratios and foaming agent dosages. The compressive strength increased with density as a power function. The splitting tensile strength

**收稿日期:** 2021-12-20

**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFD1101004); 甘肃省建设厅项目(JK2020-26)

**作者简介:** 王秀丽(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨空间结构、装配式钢结构和建筑围护系统研究, E-mail: 1135739056@qq.com.

**Received:** 2021-12-20

**Foundation items:** National Key Research and Development Plan of China (No. 2019YFD1101004); Construction Department Project of Gansu Province (No. JK2020-26)

**Author brief:** WANG Xiuli (1963-), professor, doctoral supervisor, main research interests: large span space structure, prefabricated steel structure and building enclosure system, E-mail: 1135739056@qq.com.

increased exponentially with the increase of compressive strength. When the water-to-binder ratio was 0.45, the flexural strength increased first and then decreased with the increase of fiber content. When the water-to-binder ratio was 0.50, the flexural strength increased with the increase of fiber content. The incorporation of fiber increased the pore size and water absorption rate of foam concrete, and reduced its frost resistance.

**Keywords:** straw fiber; foam concrete; bubble pore size; mechanical properties; frost resistance

泡沫混凝土是用机械方法将发泡剂水溶液制备成泡沫,然后将已制得的泡沫和以水泥等胶凝材料所制成的料浆均匀搅拌,经浇注成型、养护而成的含有大量、微小、独立、均匀分布气泡的轻质混凝土材料<sup>[1]</sup>。由于该材料具有轻质高强、保温性能良好等优点,在建筑围护墙体中应用广泛<sup>[2-6]</sup>。但泡沫混凝土抗拉强度低、抗冲击能力差、抗裂能力差,导致其在一些工程中的应用受限<sup>[7]</sup>。

在泡沫混凝土中,三维乱向分布纤维的掺入可以使其由典型的脆性行为变为弹塑性行为,从而提高抗压强度、抗拉强度和延性等性能<sup>[8]</sup>。Daneti等<sup>[9]</sup>发现聚丙烯纤维在提高轻质泡沫混凝土抗弯韧性和控制收缩开裂行为方面有显著的效果。Mirza等<sup>[10]</sup>研究了耐碱玻璃纤维对泡沫混凝土抗弯强度、延性、约束收缩开裂和耐温性能的影响,结果表明:当纤维质量分数为1.0%~2.0%(体积分数为0.25%~0.5%)时,能够有效控制泡沫混凝土的约束收缩裂缝,提高其抗弯韧性。Sun等<sup>[11]</sup>发现聚丙烯纤维对泡沫混凝土的干燥收缩有抑制作用。刘一飞等<sup>[12]</sup>研究了聚丙烯纤维长度和纤维类型对泡沫混凝土抗压、劈裂抗拉强度的影响,发现短丝纤维对强度的提升优于长丝纤维,网状纤维对强度的改善优于丝状纤维。Falliano等<sup>[13]</sup>发现聚合物纤维能大大提高泡沫混凝土的抗折强度,但对提高抗压强度作用不大。

目前增强泡沫混凝土最常见的纤维类型是合成纤维。然而,使用天然纤维作为增强材料越来越普遍。由于天然纤维具有力学性能良好、密度低、成本低、可生物降解、可再生和促进可持续性等优点,越来越受到人们的关注<sup>[14-17]</sup>。农作物秸秆纤维作为天然纤维,在中国储量极为丰富。据统计,中国每年大约生产10亿t农作物秸秆,给城市和自然环境带来了严重的负担<sup>[18]</sup>。考虑到资源和环境问题,将农作物秸秆纤维利用到建筑材料领域,既能为农作物秸秆资源综合利用提供新渠道,又能响应国家绿色建筑的号召。近年来,许多研究已经证实了秸秆纤维与水泥基材料复合的可行性<sup>[19-23]</sup>,但对于秸秆纤维增强泡沫混凝土的研究相对较少。笔者采用动物蛋白发泡剂,通过机械发泡法,以普通硅酸盐水泥、硅灰、偏高岭土、粉煤灰为胶凝材料、

稻草纤维为增韧材料,制备泡沫混凝土,研究纤维掺量对不同水胶比和发泡剂掺量泡沫混凝土的物理力学性能的影响,为农作物秸秆纤维在泡沫混凝土中的应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

1)胶凝材料:42.5级普通硅酸盐水泥,初凝时间150 min,终凝时间230 min,抗压强度45.91 MPa(28 d),抗折强度6.88 MPa(28 d);硅灰,比表面积约为20 m<sup>2</sup>/g;偏高岭土,比表面积约为0.93 m<sup>2</sup>/g;粉煤灰,I级粉煤灰。

2)发泡剂:市售动物蛋白发泡剂,稀释倍数30,发泡倍数35,泌水性70 mL/h。

3)减水剂:聚羧酸系高性能减水剂。

4)稻草纤维:先用5%的NaOH溶液浸泡48 h,然后清洗至中性(清洗用水pH值在7~8范围内即视为中性),并在(50±5)℃的烘箱中烘至恒备用(每隔12 h称重一次,相邻两次称重的质量差小于1%即视为恒重)。纤维长度6~10 mm,处理前后的纤维如图1所示。



(a) 处理前

(b) 处理后

图1 处理前后的稻草纤维

Fig. 1 Straw fiber before and after treatment

### 1.2 试验方案及测试方法

#### 1.2.1 试验方案

采用全因子试验,研究纤维掺量对不同水胶比和发泡剂掺量泡沫混凝土的物理力学性能的影响。试验配合比见表1。其中,水胶比分别为0.45和0.50;纤维掺量分别为0%、1%、2%、3%、4%(占胶

凝材料:水泥、硅灰、偏高岭土和粉煤灰的总质量比);发泡剂掺量分别为0.3%和0.6%(占胶凝材料总质量比);硅灰和偏高岭土掺量均固定占胶凝材料总质量的10%;粉煤灰掺量固定占胶凝材料总质量的5%;CaCl<sub>2</sub>作为促凝剂,掺量固定占胶凝

材料总质量的1%;减水剂用量以胶凝净浆流动度保持在(215±5)mm范围内为依据。表中编号中的W/B代表水胶比,F代表发泡剂掺量。例如W/B-0.45,F-0.3%表示水胶比为0.45,发泡剂掺量为0.3%。

表1 纤维增强泡沫混凝土配合比  
Table 1 Mix proportion of fiber-reinforced foam concrete

编号	配合比/(kg/m <sup>3</sup> )									
	水	水泥	硅灰	偏高岭土	粉煤灰	发泡剂	纤维	减水剂	CaCl <sub>2</sub>	
I (W/B-0.45, F-0.3%)	I-1	360.89	601.49	80.20	80.20	40.10	2.42	0.00	0.40	8.06
	I-2	359.60	599.34	79.91	79.91	39.96	2.38	7.94	1.19	7.94
	I-3	319.42	532.37	70.98	70.98	35.49	2.13	14.22	2.13	7.11
	I-4	309.86	516.43	68.86	68.86	34.43	2.06	20.58	2.74	6.86
	I-5	248.22	413.70	55.16	55.16	27.58	1.68	22.38	2.80	5.59
II (W/B-0.45, F-0.6%)	II-1	193.09	321.82	42.91	42.91	21.45	2.58	0.00	0.22	4.31
	II-2	216.13	360.22	48.03	48.03	24.01	2.88	4.81	1.44	4.81
	II-3	190.72	317.87	42.38	42.38	21.19	2.54	8.48	1.27	4.24
	II-4	145.97	243.29	32.44	32.44	16.22	1.95	9.73	1.46	3.24
	II-5	116.63	194.38	25.92	25.92	12.96	1.56	10.37	1.56	2.59
III (W/B-0.5, F-0.3%)	III-1	305.00	457.50	61.00	61.00	30.50	1.82	0.00	0.12	6.07
	III-2	336.72	505.08	67.34	67.34	33.67	2.00	6.65	0.67	6.65
	III-3	324.86	487.29	64.97	64.97	32.49	1.93	12.85	1.29	6.43
	III-4	320.10	480.14	64.02	64.02	32.01	1.92	19.18	1.92	6.39
	III-5	275.34	413.01	55.07	55.07	27.53	1.67	22.31	2.23	5.58
IV (W/B-0.5, F-0.6%)	IV-1	181.80	272.70	36.36	36.36	18.18	2.21	0.00	0.18	3.68
	IV-2	218.63	327.95	43.73	43.73	21.86	2.59	4.31	0.65	4.31
	IV-3	221.70	332.55	44.34	44.34	22.17	2.67	8.88	1.33	4.44
	IV-4	198.05	297.08	39.61	39.61	19.81	2.36	11.78	1.57	3.93
	IV-5	218.91	328.37	43.78	43.78	21.89	2.61	17.37	2.17	4.34

### 1.2.2 测试方法

试块制备:首先将水泥、硅灰、偏高岭土、粉煤灰干拌30s,使粉料混合均匀。然后加水(扣除泡沫制备用水)、减水剂和CaCl<sub>2</sub>,搅拌1.5min后加入纤维再搅拌1.5min(不加纤维省略此步骤)。在浆料搅拌的同时,按比例将发泡剂用水稀释之后用高速搅拌器将稀释液制成泡沫。将泡沫加入浆料中搅拌2min,使泡沫和浆料混合均匀。最后将泡沫混凝土直接浇筑到试模当中,并用保鲜膜覆盖。试件静置24h后脱模,并在温度为(20±3)℃、相对湿度大于90%的环境中养护至测试期龄。

吸水率及力学性能测试:试件养护完成后,在(80±5)℃下烘至恒重。吸水率按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020)进行;抗压、抗折强度按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)进行;劈裂抗拉强度按照《水泥砂浆和混凝土干燥收缩开裂性能试验方法》(GB/T 29417—2012)进行。试件尺寸均为40mm×40mm×160mm。

抗冻性能测试:参考《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020),以冻12h和融12h作为一次冻融循环,以此冻融循环30次。冻融循环结束后,将试块在(80±5)℃下烘至恒重,再按照GB/T 17671—2021和GB/T 29417—2012测试冻融循环之后试件的抗压、抗折和劈裂抗拉强度。试件尺寸均为40mm×40mm×160mm。

泡孔尺寸的测量:将40mm×40mm×160mm的棱柱体试件四等分,每隔40mm进行切割,并用HC-U81混凝土超声波检测仪的测缺功能测量泡沫混凝土的泡孔直径。每个面任意取3个点进行泡孔直径测量,然后将3个面测得的9个数值取平均值为该试件平均泡孔直径。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 泡沫混凝土的密度

泡沫混凝土的密度随纤维掺量的变化如图2所示。由图2可知:

1)对于不同水胶比以及发泡剂掺量,随着纤维

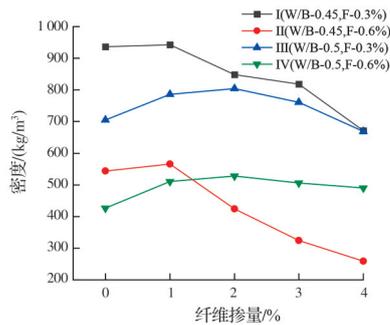


图 2 泡沫混凝土密度随纤维掺量的变化

Fig. 2 Variation of foam concrete density with fiber content

掺量的增加,泡沫混凝土的密度都呈现出先增加后降低的变化规律。分析原因:稻草纤维是天然的纤维素纤维,其内部孔隙率高达 83.5%<sup>[24]</sup>,同时纤维素表面的羟基有很强的亲水性<sup>[25]</sup>,这导致其吸水性强。稻草纤维的掺入会使胶凝浆体内部的水分迁移到纤维内部孔隙当中,导致浆体流动度下降。当纤维掺量较低时,纤维的吸水作用导致纤维胶凝混合浆体流动度降低,且此时纤维对气泡的“滞留”作用较弱。在混合浆体与泡沫混合搅拌的过程中,细小、独立的气泡相互之间融合成为较大的气泡并破灭溢出浆体的程度较高。另外,泡沫的密度远低于纤维的密度,因此,密度随纤维掺量的增加而小幅增加;纤维掺量进一步增加,一方面在胶凝浆体搅拌过程中会引入更多的气泡,这会导致密度有所降低;另一方面,虽然纤维的吸水作用会使胶凝浆体流动度进一步下降,且搅拌过程中细小、独立的气泡相互之间融合成为较大的气泡的程度进一步增加。但此时悬浮在胶凝浆体中的纤维增多,它们乱向分布形成三维网状结构,对气泡的“滞留”作用显著增强,这能有效防止泡沫破灭溢出浆体,更多的气泡被纤维滞留在浆体内部,从而使密度降低。如图 3 所示,泡孔尺寸随纤维掺量的增加而增加。除此之外,纤维的加入也会使密度进一步降低。因此,随着纤维掺量进一步增加,泡沫混凝土的密度逐渐降低。

2) 水胶比和发泡剂掺量不同,纤维掺量对泡沫

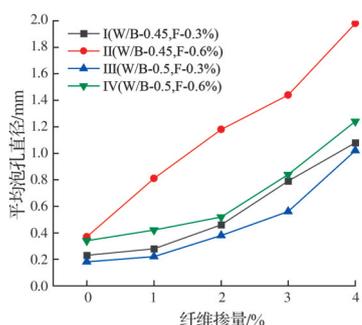


图 3 泡孔尺寸随纤维掺量的变化

Fig. 3 Variation of bubble pore size with fiber content

混凝土的密度增幅的影响也不相同。当水胶比为 0.45 时, I、II 系列试件的密度在 1% 纤维掺量时便达到峰值,且相比素泡沫混凝土增幅相对较小,分别为 0.71% 和 4.07%;当水胶比为 0.5 时, III、IV 系列试件的密度在纤维掺量为 2% 时达到峰值,且相比素泡沫混凝土增幅相对较大,分别为 14.06% 和 23.81%。这是因为当水胶比为 0.45 时,胶凝浆体本身含水率低,泡沫破灭量较大。当掺入纤维时,由纤维吸水作用导致的泡沫破灭量增加的程度相对较低,因而密度增幅小。另外,纤维的“滞留”作用也能防止部分泡沫破灭溢出浆体,这也会减小密度的增幅;当水胶比为 0.5 时,胶凝浆体本身含水量高,泡沫破灭量相对较小。纤维的掺入使胶凝浆体流动度下降明显,泡沫破灭量显著增加,因此,密度增幅大。但同时,纤维的“滞留”作用能在一定程度上防止泡沫破灭溢出,使密度增幅放缓。如图 2 所示, III、IV 系列试件密度的增幅大于 I、II 系列试件,且增幅随纤维掺量的增加而逐渐放缓。

3) 水胶比和发泡剂掺量不同,在达到最大密度之后,泡沫混凝土的密度随纤维掺量增加而降低的程度也不相同。当纤维掺量为 4% 时, 0.45 水胶比试件的密度相比峰值降低幅度相对较大,分别为 28.76% 和 54.19%; 0.5 水胶比试件的密度相比峰值降低幅度相对较小,分别为 16.77% 和 7.20%。这是因为对于低水胶比试件而言,其本身泡沫破灭量较高,在纤维掺量较高时,纤维的“滞留”作用大大减少了泡沫的破灭溢出量,大部分泡沫互相融合并被滞留在胶凝浆体内部,因此,密度降低幅度较大;对于高水胶比试件,其本身泡沫破灭量较少,在纤维掺量较高时,由纤维吸水导致的泡沫破裂量增加和纤维的“滞留”效果综合作用,导致密度降低幅度较小。

## 2.2 泡沫混凝土的吸水率

泡沫混凝土的吸水率如图 4 所示。吸水率随纤维掺量的增加而增加,且当纤维掺量较低时,纤维掺量对吸水率的影响较小,在达到一定数值后,纤维掺量对吸水率的影响增加。当纤维掺量达到最大时, I、II、III、IV 系列试件的吸水率分别为 31.60%、58.66%、28.99% 和 44.71%,相比纤维掺量为 0 的试件分别提高了 16.39%、20.87%、10.21% 和 15.85%。分析原因:试验中,泡沫混凝土吸水主要通过毛细孔渗透作用、纤维的吸水渗透作用和连通孔渗透作用进行,增加泡沫混凝土中连通孔的比率将增加其吸水率<sup>[26]</sup>。随着纤维掺量的增加,泡孔尺寸逐渐增大,并且连通泡孔比例增加,这会使吸水率增加。另外,通常增加泡沫混凝土的密

度会降低其吸水率,但试验试件吸水率没有出现随密度的增加而降低的现象。这是因为,一方面,虽然当纤维掺量较低时,纤维的掺入会使泡沫破灭溢出浆体的数量增加,但由于纤维吸水率高,这在一定程度上能抵消一部分由泡沫破灭而导致的吸水率降低;另一方面,本试验选取的纤维长度在6~10 mm 范围内,远大于泡孔直径,大量纤维会贯穿数个泡孔。同时由于纤维的孔隙率高,吸水、渗水性强,因此可以将纤维贯穿的泡孔近似看作连通状态,这也会使吸水率增加。综上,在纤维掺量较低时,虽然泡沫破灭量较大,密度有所增加,吸水率依然不降反增,但增幅较小;在纤维掺量较高时,吸水率同样随纤维掺量的增加而持续增加,且增幅明显变大。

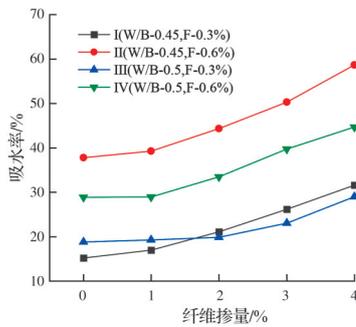


图 4 泡沫混凝土的吸水率随纤维掺量的变化

Fig. 4 Variation of water absorption of foam concrete with fiber content

### 2.3 抗压强度

泡沫混凝土的抗压强度随纤维掺量的变化如图 5 所示。由图 5 可知:

1) 试件的抗压强度均随纤维掺量的增加先增加后降低。分析原因:在泡沫混凝土中,抗压强度与泡孔结构密切相关。虽然纤维的掺入会使泡孔尺寸增加,但改性稻草纤维与胶凝材料黏结较好,并且能够约束裂缝的发展。因此,在一定掺量范围内,纤维能提高泡沫混凝土的抗压强度。当纤维掺量较高时,泡孔尺寸和连通泡孔数量过大会导致强

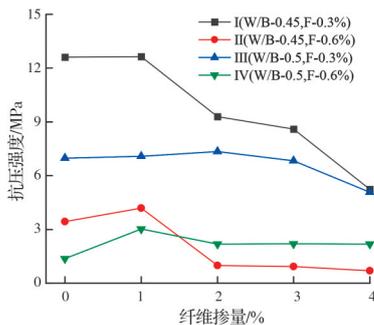


图 5 泡沫混凝土的抗压强度随纤维掺量的变化

Fig. 5 Variation of compressive strength of foam concrete with fiber content

度降低。因此,试件抗压强度先增加后降低。

2) 相同水胶比,纤维对 0.3% 发泡剂掺量试件抗压强度的提升低于 0.6% 发泡剂掺量的试件。例如,当水胶比为 0.45 时, I、II 系列试件的最大抗压强度相比素泡沫混凝土分别增加了 0.16% 和 22.5%;水胶比为 0.5 时, III、IV 系列试件的最大抗压强度相比素泡沫混凝土提高了 5.42% 和 120.69%。这说明在一定掺量范围内,纤维对低密度泡沫混凝土抗压强度的提升作用更大。

3) 相同发泡剂掺量,纤维对 0.5 水胶比试件抗压强度的提升大于 0.45 水胶比的试件。例如在 0.3% 发泡剂掺量下, III 系列试件的最大抗压强度相比素泡沫混凝土提升大于 I 系列试件; IV 系列试件的最大抗压强度相比素泡沫混凝土的提升大于 II 系列试件。结合图 2 泡沫混凝土的密度,这同样也说明在一定掺量范围内,纤维对低密度泡沫混凝土抗压强度的增幅更为明显。

稻草纤维增强泡沫混凝土的抗压强度受到密度、纤维掺量、泡孔结构、发泡剂掺量和水胶比等因素的综合影响。为了分析稻草纤维增强泡沫混凝土的密度对抗压强度的影响,对抗压强度与密度之间的关系进行了拟合,如图 6 所示,试件的抗压强度随密度增加呈幂函数增加关系,抗压强度  $P$  与密度  $\rho$  之间的关系式为  $P=2.64 \times 10^{-7} \rho^{2.58}$ ,  $R^2=0.98$ ,拟合效果良好。

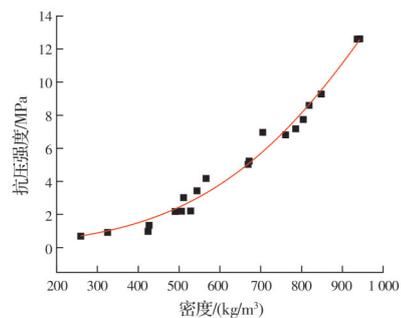


图 6 抗压强度与密度关系

Fig. 6 Relationship between compressive strength and density

### 2.4 抗折强度

图 7 给出了泡沫混凝土的抗折强度与纤维掺量之间的关系,由图 7 可知:

1) 水胶比不同,纤维掺量对泡沫混凝土抗折强度的影响不同。当水胶比为 0.45 时,试件的抗折强度随纤维掺量的增加先增加后降低。当水胶比为 0.5 时,试件的抗折强度随纤维掺量的增加而增加。这是因为稻草纤维增强泡沫混凝土的抗折强度主要受纤维掺量和泡孔特征的影响。当水胶比较低时,胶凝浆体含水率较低。随着纤维掺量的增加,纤维的吸水作用使泡孔尺寸和连通泡孔数量的增

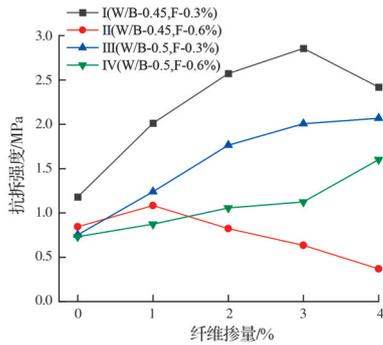


图7 泡沫混凝土的抗折强度随纤维掺量的变化

Fig. 7 Variation of flexural strength of foam concrete with fiber content

幅较大,从而导致纤维的“加筋”作用降低严重。当纤维掺量过高时,在加载过程中,随着裂缝的开展,纤维在较低荷载水平下便被拔出。因此,当纤维掺量达到一定数值后,抗折强度不升反降;当水胶比较高时,胶凝浆体含水率高,泡孔尺寸和连通泡孔数量的增幅较小,纤维与基体黏结力高,“加筋”作用明显,因此强度持续增加。

2) 相同水胶比,发泡剂掺量不同,纤维掺量对试件抗折强度的影响也不相同。当水胶比为 0.45 时,纤维对低发泡剂掺量试件的抗折强度提升率大于高发泡剂掺量的试件,0.5 水胶比的试件也有类似结论。分析原因:由于水胶比固定,0.3% 发泡剂掺量所需的发泡用水相对较少,胶凝浆体含水率相对较高,纤维的吸水作用对泡孔结构的影响相对较小。除此之外,低发泡剂掺量的试件泡沫含量低,孔壁相对较厚,纤维与胶凝基体的粘结力相对较高,“加筋”作用明显;而 0.6% 发泡剂所需的发泡用水相对较多,胶凝浆体含水率降低,纤维的吸水作用对泡孔结构的影响增加。另外,泡沫含量增加导致孔壁变薄,纤维的“加筋”作用降低。因此,低发泡剂掺量试件的抗折强度增幅更大。

## 2.5 劈裂抗拉强度

图 8 给出了劈裂抗拉强度与纤维掺量之间的关系。由图 8 可知:

1) 泡沫混凝土的劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加先增大后减小。虽然纤维的“加筋”作用能在一定程度上提高泡沫混凝土的劈裂抗拉强度,但同时由于纤维的吸水作用,泡孔尺寸也随其掺量的增加而逐渐增加,这会对强度产生不利影响。两者综合作用,使泡沫混凝土的劈裂抗拉强度先增加后降低。

2) 水胶比相同,发泡剂掺量不同,纤维对试件劈裂抗拉强度的影响不同。例如,当水胶比 0.45 时, I 系列试件的劈裂抗拉强度在纤维掺量为 2%

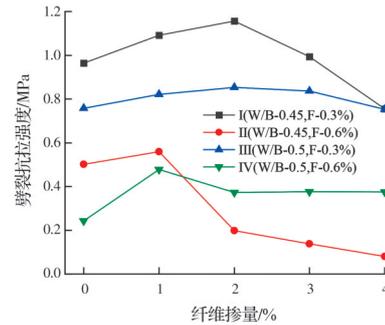


图8 泡沫混凝土的劈裂抗拉强度随纤维掺量的变化

Fig. 8 Variation of splitting tensile strength of foam concrete with fiber content

时达到最大值,而 II 系列试件在纤维掺量为 1% 时达到最大。0.5 水胶比的试件也有类似结论。分析原因:如图 3 所示,0.3% 发泡剂掺量试件在纤维掺量为 2% 时的泡孔尺寸与 0.6% 发泡剂掺量试件在纤维掺量为 1% 时的泡孔尺寸相当甚至更小,即纤维的吸水作用对低发泡剂掺量试件的泡孔结构影响较小,因此最大劈裂抗拉强度对应的纤维掺量相对较高。

3) 在劈裂抗拉强度达到最大值后,在发泡剂掺量相同的情况下,纤维掺量的增加对 0.45 水胶比试件劈裂抗拉强度的降低程度大于 0.5 水胶比的试件。且当纤维掺量超过一定数值后,0.45 水胶比试件的劈裂抗拉强度甚至低于素泡沫混凝土。原因是当发泡剂掺量相同时,由于纤维的吸水作用,低水胶比试件泡孔尺寸明显大于高水胶比的试件,这会使其强度降低更加明显。

4) 泡沫混凝土的抗压强度会对其劈裂抗拉强度产生影响。这是因为在劈裂破坏过程中,抗压强度较低的试件局部压碎现象更严重。如图 9 所示, IV-4 试件的局部压碎程度明显高于 III-4 试件。为了进一步分析劈裂抗压强度与劈裂抗拉强度之间的关系,对两者进行了拟合,发现劈裂抗拉强度随抗压强度呈指数函数增加关系,如图 10 所示。两者关

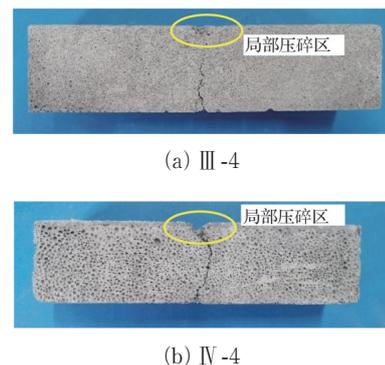


图9 试件劈裂抗拉破坏模式

Fig. 9 Splitting tensile failure diagram of specimen

系式为  $P_s = -1.22 \times e^{-P/5.41} + 1.18$ , 式中  $P_s$  劈裂抗拉强度,  $P$  为抗压强度。  $R^2 = 0.96$ , 拟合效果良好。

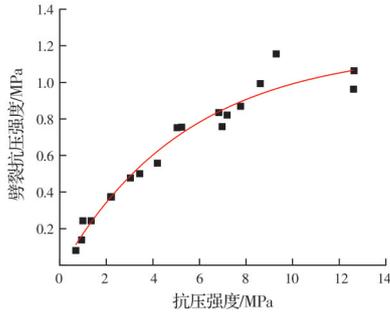


图 10 劈裂抗拉强度与抗压强度的关系

Fig. 10 Relationship between splitting tensile strength and compressive strength

### 2.6 抗冻性能

为了研究纤维增强泡沫混凝土的抗冻性能,对试件进行 30 次冻融循环,然后测试并分析其抗压、抗折和劈裂抗拉强度在冻融循环前后的变化。试件强度变化按式(1)计算。

$$W = \frac{f_0 - f_1}{f_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $W$  为强度变化率;  $f_0$  为试件冻融前强度, MPa;  $f_1$  为试件冻融后强度, MPa。冻融循环后的抗压、抗折和劈裂抗拉强度变化率见图 11~图 13。分析可知:

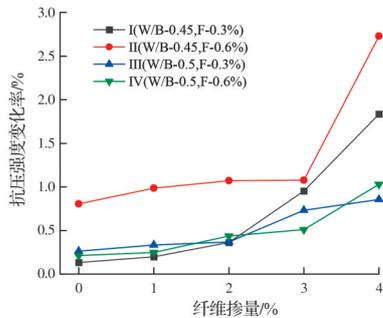


图 11 冻融循环后抗压强度变化率随纤维掺量的变化  
Fig. 11 Variation of compressive strength change rate with fiber content after freeze-thaw cycle

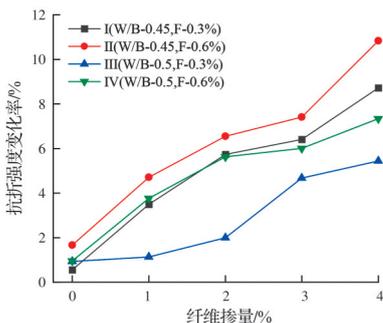


图 12 冻融循环后抗折强度变化率随纤维掺量的变化  
Fig. 12 Variation of flexural strength change rate with fiber content after freeze-thaw cycle

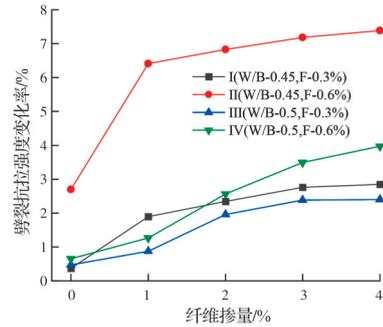
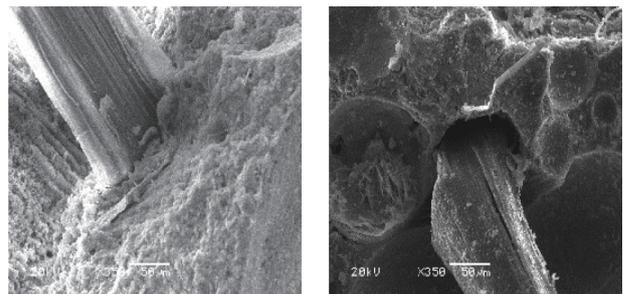


图 13 冻融循环后劈裂抗拉强度变化率随纤维掺量的变化  
Fig. 13 Variation of splitting tensile strength change rate with fiber content after freeze-thaw cycle

1) 试件的抗压、抗折和劈裂抗拉强度在经过冻融循环之后均出现不同程度的降低,且降低率随纤维掺量的增加而增加。这是因为纤维本身吸水率高,在冻融循环过程中纤维与基体的粘结被削弱。如图 14 所示,冻融循环之前,纤维与基体粘结良好;冻融循环之后,纤维与基体产生明显的间隙,这会使纤维的增强作用降低,从而导致强度降低。



(a) 冻融前 (b) 冻融后

图 14 泡沫混凝土冻融循环前后的微观形貌

Fig. 14 Micro-morphology of foam concrete before and after freeze-thaw cycle

2) 冻融循环后,纤维的掺量对抗折强度降低率影响最大,劈裂抗拉强度次之,抗压强度最小。这是因为泡沫混凝土抗压强度主要取决于泡孔结构和胶凝基体强度,纤维本身对抗压强度的贡献相对较小。而对于抗折和劈裂抗拉强度,胶凝基体的抗拉强度较低,纤维对强度的贡献相对较大。冻融循环之后,纤维与胶凝基体之间的粘结作用削弱严重,而对胶凝基体本身的损伤较小,因此,抗压强度降低率小于抗折强度和劈裂抗拉强度。

3) 低纤维掺量对抗压强度降低率的影响较小,在达到一定数值后,其对抗压强度降低率的影响变大。例如 I、III 系列试件的抗压强度降低率在纤维掺量超过 2% 后突然增大,II、IV 系列试件在超过 3% 后突然增大。

4) 对于含有稻草纤维的试件,在同一水胶比下,0.3% 发泡剂掺量试件的抗折/劈裂抗拉强度降

低率低于0.6%发泡剂掺量的试件,在同一发泡剂掺量下,0.5水胶比试件的抗折/劈裂抗拉强度降低率低于0.45水胶比的试件;劈裂抗拉强度降低率也有类似的变化规律。

### 3 结论

1)纤维掺量较低时,其“滞留”作用较弱,受纤维吸水的影响,泡沫破灭量相对较大,试件密度增加;纤维掺量较高时,“滞留”作用增强,泡沫破灭量减小,试件密度降低。纤维掺量对试件密度的影响随水胶比和发泡剂掺量的不同而不同。

2)高吸水、渗水率稻草纤维的掺入使泡孔尺寸和连通泡孔数量增加,泡沫混凝土的吸水率随纤维掺量的增加而增加。

3)抗压强度随纤维掺量的增加先增加后减小。在一定掺量范围内,纤维对低密度等级泡沫混凝土抗压强度的增幅更为明显。抗压强度随密度增加呈幂函数增长。

4)劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加先增加后减小。低发泡剂掺量试件的最大强度对应的纤维掺量更高。在达到最大强度后,纤维掺量对高水胶比试件强度的影响小于低水胶比的试件。劈裂抗拉强度随抗压强度的增加呈指数增加关系。

5)稻草纤维的加入能显著提高泡沫混凝土的抗折强度,强度增幅受纤维掺量、水胶比和发泡剂掺量的综合影响。0.5水胶比试件的抗折强度随纤维掺量的增加而增加,0.45水胶比试件的抗折强度在纤维掺量超过一定限值后不增反降。纤维对低发泡剂掺量试件的抗折强度提升更大。

6)冻融循环对纤维与胶凝基体的粘结损伤较大。随着纤维掺量的增加,泡沫混凝土的抗压、抗折和劈裂抗拉强度在冻融循环之后的损失率均逐渐增加,且损失程度:抗折强度>劈裂抗拉强度>抗压强度。

### 参考文献

[1] 唐明,徐立新.泡沫混凝土材料与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.  
TANG M, XU L X. Foamed concrete materials and engineering applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

[2] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.  
SONG Q, ZHANG P, BAO J W, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 398-410. (in Chinese)

[3] 潘晓冰,李静.泡沫混凝土的特性和应用及未来发展趋势[J].混凝土与水泥制品,2020(6):98-102.  
PAN X B, LI J. Characteristics and application of foam concrete and its future development trend [J]. China Concrete and Cement Products, 2020(6): 98-102. (in Chinese)

[4] GENCEL O, YAVUZ BAYRAKTAR O, KAPLAN G, et al. Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization [J]. Construction and Building Materials, 2021, 294: 123607.

[5] 竺万发,张业红,苏英,等.我国泡沫混凝土的研究进展及工程应用[J].材料导报,2013,27(Sup1):317-320.  
ZHU W F, ZHANG Y H, SU Y, et al. Study progress and engineering applications of foamed concrete in China [J]. Materials Review, 2013, 27(Sup1): 317-320. (in Chinese)

[6] 李猛,黄寅生,张少波,等.泡沫混凝土的研究进展及展望[J].材料导报,2016,30(Sup1):402-405.  
LI M, HUANG Y S, ZHANG S B, et al. Development of research and prospect on foam concrete [J]. Materials Review, 2016, 30(Sup1): 402-405. (in Chinese)

[7] CASTILLO-LARA J F, FLORES-JOHNSON E A, VALADEZ-GONZALEZ A, et al. Mechanical properties of natural fiber reinforced foamed concrete [J]. Materials, 2020, 13(14): 3060.

[8] AMRAN Y H M, FARZADNIA N, ABANG ALI A A. Properties and applications of foamed concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990-1005.

[9] DANETI S B, WEE T H, THANGAYAH T S. Effect of polypropylene fibres on the shrinkage cracking behaviour of lightweight concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(11): 871-881.

[10] MIRZA F A, SOROUSHAN P. Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(2): 223-227.

[11] SUN H Y, GONG A M, PENG Y L, et al. The study of foamed concrete with polypropylene fiber and high volume fly ash [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93: 1039-1043.

[12] 刘一飞,李天成,曾雪花,等.纤维增强泡沫混凝土的力学强度及吸水性能[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(3):120-126.  
LIU Y F, LI T C, ZENG X H, et al. Mechanical strength and water absorption capability of fiber-reinforced foamed concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 120-126. (in Chinese)

- [13] FALLIANO D, DE DOMENICO D, RICCIARDI G, et al. Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: effect of fiber content, curing conditions and dry density [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 479-493.
- [14] KANDEMIR A, POZEGIC T R, HAMERTON I, et al. Characterisation of natural fibres for sustainable discontinuous fibre composite materials [J]. *Materials*, 2020, 13(9): 2129.
- [15] FRYDRYCH M, HÝSEK Š, FRIDRICOVÁ L, et al. Impact of flax and basalt fibre reinforcement on selected properties of geopolymer composites [J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 118.
- [16] HOYOS C G, ZULUAGA R, GAÑÁN P, et al. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 1540-1548.
- [17] CHIACCHIARELLI L M, CERRUTTI P, FLORES-JOHNSON E A. Compressive behavior of rigid polyurethane foams nanostructured with bacterial nanocellulose at low and intermediate strain rates [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(20): 48701.
- [18] SHANG X Y, SONG S Q, YANG J W. Comparative environmental evaluation of straw resources by LCA in China [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1-16.
- [19] JIANG D M, AN P H, CUI S P, et al. Effect of modification methods of wheat straw fibers on water absorbency and mechanical properties of wheat straw fiber cement-based composites [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 5031025.
- [20] JIANG D M, AN P H, CUI S P, et al. Effect of straw fiber modification methods on compatibility between straw fibers and cement-based materials [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8392935.
- [21] XIE X L, GOU G J, WEI X, et al. Influence of pretreatment of rice straw on hydration of straw fiber filled cement based composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 449-455.
- [22] XIAO L G, LIU X X. Effect of straw carbonization on properties of cement-based straw fiber composites [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 267(2): 022024.
- [23] 蹇守卫, 汪婷, 马保国, 等. 改性水稻秸秆对水泥基材料性能影响研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(6): 132-135.
- JIAN S W, WANG T, MA B G, et al. Study on the effect of the modified rice straw on the performance of the cement-based materials [J]. *Materials Review*, 2014, 28(6): 132-135. (in Chinese)
- [24] 刘洪凤, 俞镇慌. 秸秆纤维性能[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2002, 28(2): 123-128.
- LIU H F, YU Z H. Properties of straw fiber [J]. *Journal of Donghua University, Natural Science*, 2002, 28(2): 123-128. (in Chinese)
- [25] ALVAREZ V A, RUSCEKAITE R A, VAZQUEZ A. Mechanical properties and water absorption behavior of composites made from a biodegradable matrix and alkaline-treated sisal fibers [J]. *Journal of Composite Materials*, 2003, 37(17): 1575-1588.
- [26] 黄政宇, 孙庆丰, 周志敏. 硅酸盐-硫铝酸盐水泥超轻泡沫混凝土孔结构及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(9): 1894-1899.
- HUANG Z Y, SUN Q F, ZHOU Z M. Study on pore structure and properties of ultra-light foam concrete made with OPC-SAC mixture [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(9): 1894-1899. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)