



纤维增强泡沫混凝土的力学强度 及吸水性能

刘一飞,李天成,曾雪花,王义江,高婧贤,周烁钦

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室;力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:以普通硅酸盐水泥和动物蛋白发泡剂为基材,制备了泡沫混凝土,研究了:试样强度随水灰比、干密度、纤维长度、纤维类型的变化规律;单轴受压下应力-应变全曲线;试样微观泡孔分布以及吸水性能的变化。结果表明,素泡沫混凝土和纤维增强泡沫混凝土的抗压强度均随孔隙率增加呈指数减小,水灰比对抗压强度的影响随纤维添加量、孔隙率的不同而不同。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;纤维泡沫混凝土应力-应变全曲线包括上升、下降和峰后三段,与素泡沫混凝土相比,其峰值应力对应的峰值应变减小,而弹性模量和残余应力均大幅增加;大直径泡孔占比随纤维添加量增加而降低,添加纤维提升了试样的吸水性能。

关键词:泡沫混凝土;抗压强度;应力-应变;泡孔分布;吸水性能

中图分类号:TU528.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0120-07

Mechanical strength and water absorption capability of fiber-reinforced foamed concrete

Liu Yifei, Li Tiancheng, Zeng Xuehua, Wang Yijiang, Gao Jingxian, Zhou Shuonv

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The foamed concrete (FC) was produced by using the main materials including Portland cement and foaming agent of animal protein. The effects of water-cement ratio, dry density, fiber lengths and fiber types on strengths, complete stress-strain curves under uniaxial compression, distributions of pore size and water absorption capability were investigated. Test results indicate that the compressive strength decreases exponentially with increasing porosity for both FC and fiber-reinforced foamed concrete (FRFC). The compressive strength has its different changing patterns with water-cement ratio for different fiber contents and porosities. In addition, the compressive and tensile strengths can be apparently raised by shorter fiber filament and change variously with different fiber contents. A greater improvement of compressive and tensile strengths is obtained by adding fiber meshes compared with fiber filaments under the same conditions. Three segments are discovered in the complete stress-strain curve, which include ascend,

收稿日期:2018-08-15

基金项目:国家自然科学基金(51204170)

作者简介:刘一飞(1994-),男,主要从事建筑节能材料研究, E-mail: 127483824@qq.com.

王义江(通信作者),男,博士,副教授, E-mail: wyj_cumt@163.com.

Received: 2018-08-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51204170)

Author brief: Liu Yifei (1994-), main research interest: building materials for energy saving, E-mail: 127483824@qq.com.

Wang Yijiang (correspondence author), PhD, associate professor, E-mail: wyj_cumt@163.com.

decend and fluctuant processes. The peak strain of FRFC reduces, however, the modulus of elasticity and residual strength of FRFC increases. For FRFC, the percentage of pore with larger radius decreases with increasing fiber content. Thus, the water absorption capability can be enhanced by fiber.

Keywords: foamed concrete; compressive strength; stress-strain behavior; pore distribution; water absorption capability

泡沫混凝土流动性好、密度范围广、隔热性能优、原材料消耗低,可作为装配式建筑轻型墙体及外保温层,也可作为地下废弃管线、孔洞充填材料,其物理力学性质及工程应用研究颇受关注^[1-3]。

泡沫混凝土的强度主要与密度、水灰比、骨料类型及含量、泡沫种类及添加量、泡孔直径及形状、养护方法等诸多因素有关^[4-5]。Sun等^[6]研究发现,干密度为 600 kg/m³ 时,泡沫混凝土最佳水灰比为 0.32,28 d 龄期泡沫混凝土的抗压强度达到 4.37 MPa。Jiang等^[7]发现,孔隙率在 88.5%~95.4% 时,泡沫混凝土的抗压强度为 0.12~0.75 MPa,使用早强剂和少量塑化剂以及低水灰比有利于减小泡沫混凝土的干缩及塌落。Pan等^[8]也研究了超低干密度泡沫混凝土的性质,发现干密度为 150~300 kg/m³ 时,泡沫混凝土的抗压强度为 0.33~1.1 MPa,吸水率为 6.6%~8.3%。使用稳泡剂后的泡沫要比普通方法产生的泡沫更稳定,机械发泡和化学发泡制备的试样,强度也分别提升 34% 和 20%^[9]。添加玻璃纤维可以增大高孔隙率泡沫混凝土抗压强度,Akthar等^[10]研究发现,纤维未充分分散的试样,强度并未得到提高,而纤维充分分散的试样,强度得到提高。陈兵等^[11]研究发现,添加微硅粉和聚丙烯纤维可以显著提高泡沫混凝土抗压强度,且掺入纤维后还可提高劈裂抗拉强度,并降低干缩率。

目前,对泡沫混凝土强度变化的研究多局限于特定长度纤维的室内试验^[12-14],对添加纤维后泡沫混凝土的泡孔分布、吸水性能变化以及不同长度、不同类型纤维添加后强度变化的研究相对较少。本文选择长度 3、9、12、19 mm 丝状纤维及长度为 12、19 mm 的网状纤维,进行不同纤维添加量下试样泡孔、强度、应力-应变和吸水性能实验,为泡沫混凝土物理力学性能提升提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

1) 水泥:普通复合硅酸盐水泥,筛余度 1.05%,初凝时间 220 min、终凝时间 320 min,抗压强度

20.51 MPa(3 d)、抗折强度 4.67 MPa(3 d);其化学成分如表 1 所示,主要组分为 CaO、SiO₂、Fe₂O₃ 和 Al₂O₃。

表 1 硅酸盐水泥化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of cement (by mass)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
21.60	4.13	4.57	64.44	1.06	0.11	0.56	1.74

2) 发泡剂:JT 复合动物蛋白发泡剂,稀释倍数 30,发泡倍数 35,泡沫孔径 0.5~2 mm,泌水性 72 mL(1 h)。

3) 聚丙烯纤维(Polypropylene Fiber, PF):直径 31 μm,密度 0.91×10³ kg/m³,弹性模量 3.5 GPa,抗拉强度 400 MPa,延伸率 30%,熔点 170 ℃。其中,丝状纤维选择 3、9、12、19 mm 这 4 种长度,网状纤维选择 12、19 mm 两种长度。

4) 骨料:选用标准砂作为骨料,添加量为水泥浆液质量的 5%,标准砂级配为粒径 0.075~0.25 mm,质量分数为 33.5%,0.25~0.5 mm 占 1.5%,0.5~1 mm 占 38.3%,1~2 mm 占 26.7%。

1.2 试验方案

考虑水灰比、纤维长度、纤维类型及纤维添加量共 4 类因素:

- 1) 水灰比:0.40、0.45、0.50。
- 2) 纤维长度:3、9、12、19 mm。
- 3) 纤维类型:丝状、网状。
- 4) 纤维添加量:0.5%、1.0%、1.5%、2.0%(质量分数,下同)。

1.3 试样制备

具体步骤:

- 1) 称取水泥、骨料等,加入搅拌机干拌 2 min。
- 2) 加入水,继续搅拌 2 min。
- 3) 加入纤维,搅拌 4 min。
- 4) 加入泡沫,搅拌 2~3 min(短纤维搅拌时间短)。制备好的泡沫混凝土通过搅拌机反转方式逐一浇注到标准模具,适当手工振捣并刮平表面,静置 24 h 后脱模,置于实验室定期喷水养护 7 d。

1.4 参数测试

干密度按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008)规定进行测定,抗压、抗拉强度按照《无机硬质绝热制品试验方法》(GB/T 5486.2—2001)和《泡沫混凝土砌块》(JC/T 1062—2007)要求进行测试。试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,每组选择不少于3块试样,且测试值离散度符合规范要求。

2 抗压强度变化

2.1 水灰比

选择工程常用的长度9 mm单丝纤维,测试添加量分别为0.5%、1.0%和1.5%时不同孔隙率下水灰比对抗压强度的影响,如图1所示。分析可知:

1)添加纤维后,不同水灰比下,试样抗压强度随孔隙率增加呈指数降低关系。如水灰比为0.40、纤维添加量分别为0.5%、1.0%和1.5%时,抗压强度 P 与孔隙率 φ 间的关系式分别为 $P = 46.59e^{-0.040\varphi}$ 、 $P = 87.68e^{-0.056\varphi}$ 和 $P = 51.22e^{-0.045\varphi}$,3个拟合公式相关性均为0.99以上。文献[11]指出,抗压强度随干密度增加呈指数增大,与本文中得出的抗压强度随试样孔隙率增加呈指数降低的规律一致。

2)纤维添加量不同,水灰比对抗压强度的影响也不相同。纤维添加量为0.5%时,低水灰比试样抗压强度相对较高。纤维添加量为1.0%时,3种水灰比试样抗压强度基本相等。当纤维添加量为1.5%、水灰比为0.50时,抗压强度又与孔隙率有关,当孔隙率小于40%时,低水灰比试样抗压强度相对较高;当孔隙率高于40%时,高水灰比试样抗压强度较高。

3)纤维添加量不同,泡沫混凝土抗压强度的提升幅度也不同。与素泡沫混凝土相比,孔隙率为60%、纤维添加量为0.5%、水灰比为0.40、0.45和0.50时,纤维泡沫混凝土试样的抗压强度升幅分别为29.7%、21.8和77.5%。纤维添加量为1.0%时,3种水灰比下抗压强度分别提升0%、44.9%和83.2%。纤维添加量为1.5%时,3种水灰比下抗压强度分别增加1.6%、6.2%和156.6%。

2.2 纤维长度

选择长度分别为3、9、19 mm的3种丝状纤维,测试干密度600 kg/m³左右试样的抗压强度和抗拉强度。其中,抗拉强度采用巴西劈裂法测试,抗拉强度计算公式如式(1)所示。

$$f = \frac{2P}{A\pi} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (1)$$

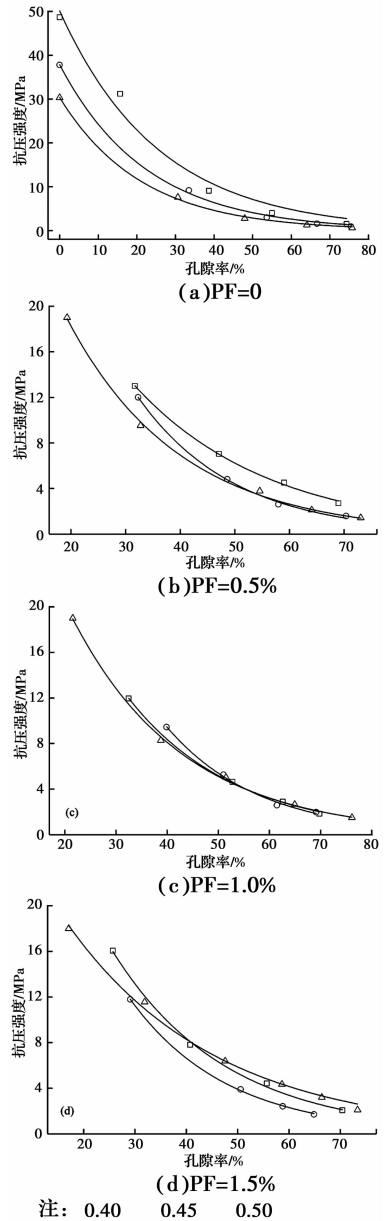
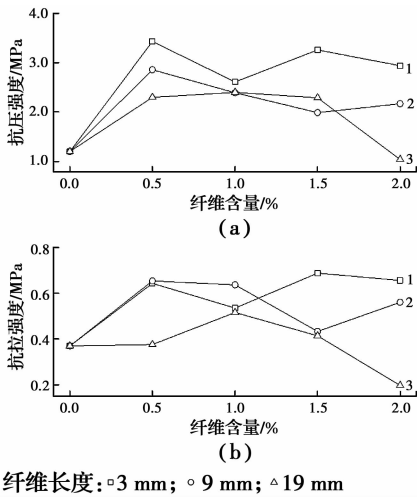


图1 纤维泡沫混凝土抗压强度与孔隙率关系

Fig. 1 Effect of porosity on compressive strength of PFCC

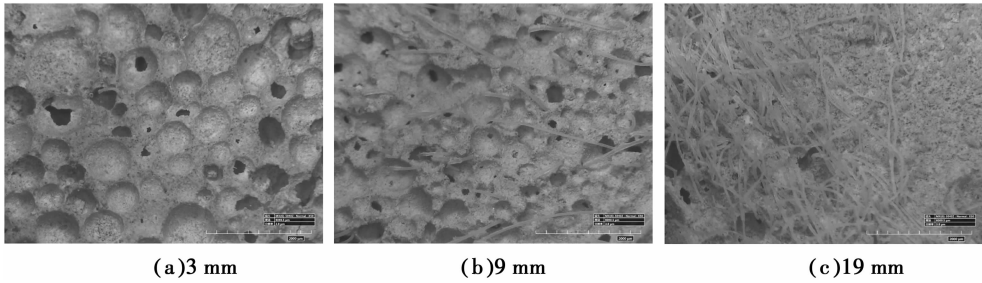
式中: f 为试样劈裂抗拉强度,MPa; P 为破坏荷载,N; A 为试件劈裂面面积,mm²。测试结果为3个试样算数平均值,且同时考虑尺寸系数0.85,3组结果的最大值或最小值偏离中间值不超过15%。测试结果如图2所示。分析发现:

1)不同长度丝状纤维对抗压/抗拉强度的提升幅度明显不同。从试验选择的3种纤维长度实测来看,短纤维更利于提升抗压、抗拉强度。添加长度为3、9、19 mm的纤维,试样抗压强度由同干密度、同水灰比素泡沫混凝土时的1.2 MPa分别增加到3.43、2.86和2.40 MPa,增幅分别为180%、130%和100%;抗拉强度由最初的0.37 MPa分别增大到

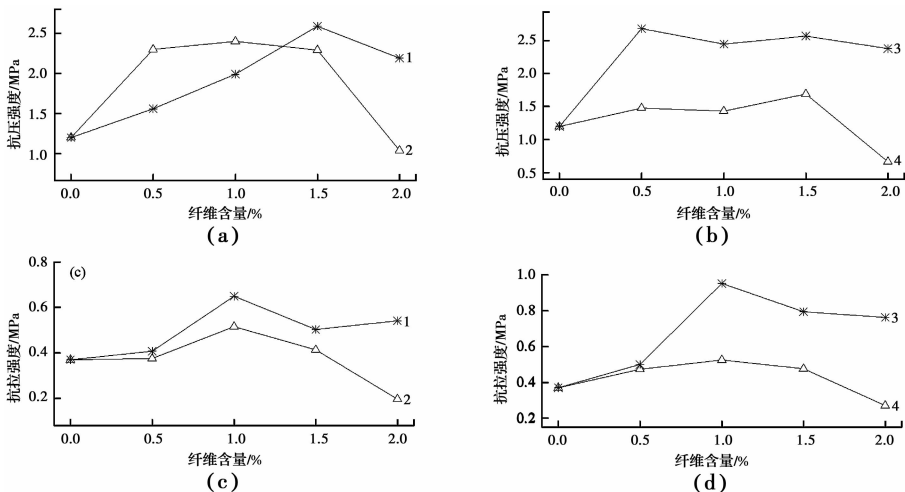


纤维长度: □ 3 mm; ○ 9 mm; △ 19 mm
 图2 纤维长度对抗压/抗拉强度影响
 Fig. 2 Effect of fiber length on compressive and tensile strengths of PFCC

0.69、0.65、0.52 MPa, 增幅分别为 86%、75%、40%, 对比发现, 3 mm 丝状纤维对抗压/抗拉强度的提升幅度最大。



(a) 3 mm (b) 9 mm (c) 19 mm
 图3 不同长度纤维分布图
 Fig. 3 Distribution of fiber with different length



纤维类型: 1.网状(19 mm); 2.丝状(19 mm); 3.网状(12 mm); 4.丝状(12 mm)
 图4 纤维类型对抗压/抗拉强度的影响
 Fig. 4 Effect of fiber type on compressive and tensile strengths of PFCC

1) 随纤维添加量增加, 网状、丝状纤维试样的抗压/抗拉强度均呈现先增大后减小的变化规律; 当含

2) 纤维长度不同, 最大抗压/抗拉强度对应的纤维添加量也不相同。纤维长度为 3、9、19 mm 时, 最优纤维添加量分别为 0.5%、0.5%、1.0% 和 1.5%、0.5%、1.0%。试样的抗压强度和抗拉强度并非随纤维添加量增加而单调增加; 当纤维添加量超过一定限值后, 试样强度反而会降低。

图3为3、9、19 mm的3种长度纤维微观分布图, 分析发现, 纤维长度越长, 试样内部越容易出现纤维团聚。如长度19 mm纤维添加量为1.5%时, 出现纤维团聚现象, 而长度3、9 mm纤维添加量为1.5%时, 纤维分布仍相对分散。对试样强度影响因素分析发现, 纤维越分散, 说明试样内部越趋于各向同性, 其强度相应越高; 如试样内部出现大面积纤维团聚, 则会导致试样强度降低。

2.3 纤维类型

选择长度为12、19 mm的丝状和网状纤维分别进行强度测试, 得到如图4所示的抗压强度与抗拉强度变化曲线, 分析发现:

量超过一定数值后, 抗压/抗拉强度甚至低于素泡沫混凝土。原因是纤维在泡沫混凝土中起到“加筋”作

用,当添加量过多时,浆体中纤维无法均匀分散,导致浆体固化后无法与纤维紧密连接,反而使得抗压与抗拉强度减小,如12、19 mm 丝状纤维添加量为2.0%时,试样抗压/抗拉强度均低于素泡沫混凝土强度。

2)纤维添加量不同时,丝状和网状纤维对抗压/抗拉强度的提升幅度不同。如图4(c)、(d)所示,当含量为0.5%时,12、19 mm 丝状及网状纤维试样抗拉强度基本相等,而其他含量时,抗拉强度有较大差别;图4(a)、(b)所示的抗压强度也有类似结论,12 mm时,丝状和网状纤维间均有较大差异,19 mm时,只有含量在1.0%~1.5%之间时差异较小。

3)网状纤维对试样抗压/抗拉强度的提升优于丝状纤维。只有图4(a)所示的含量为0.5%和1.0%时,除19 mm 丝状纤维抗压强度较高外,其余含量以及12 mm 纤维网状试样抗压/抗拉强度均高于丝状纤维。

图5所示为试样切割后的截面,发现网状纤维有较细的分支且彼此交织,与泡沫浆体连接更牢固,且在泡沫浆液中更容易均匀分散;而丝状纤维分散明显不均,出现纤维团聚现象,从而影响了试样的强度。

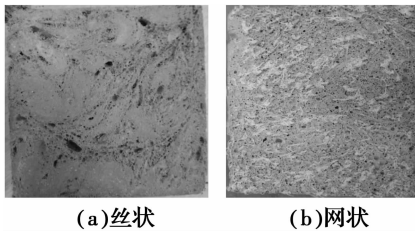


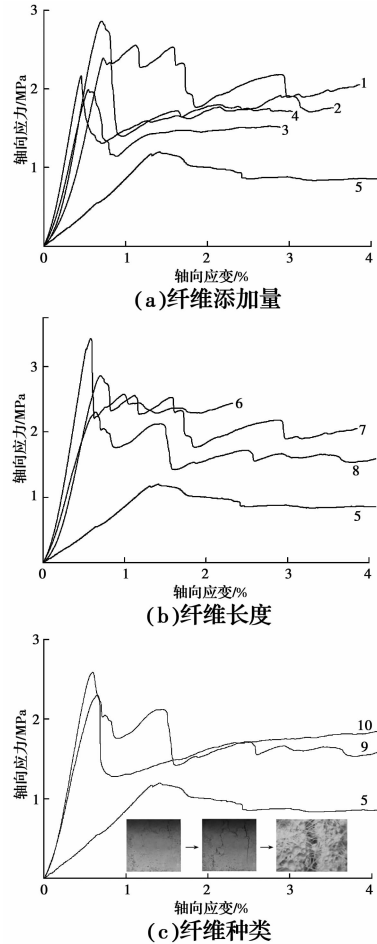
图5 丝状/网状纤维试样截面图

Fig. 5 Sectional images for specimen with fiber filament and mesh

2.4 应力-应变全曲线

试验所用泡沫混凝土的尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,试样峰值抗压强度均在3.5 MPa以下,选择DNS-100型电液伺服试验机进行试样应力-应变过程测试。该系统最大竖向静荷载为±100 kN,加载方式为0.5 mm/min 恒变形速率加载,每个试样均加载至残余应力阶段。在压力测试初始阶段,会产生一段斜率几乎为0的应力-应变曲线,经多次试验后,设置接触预载荷为2 kN(接触预应力为0.2 MPa),此时认为试验机压板与试样紧密接触、轴向位移同时清零,测试所获得的位移即为试样轴向位移。为减小试验机压板与泡沫混凝土之间摩擦引起的端部效应,在每个试件受压的上下两面均涂抹凡士林。试验数据由系统自动采集,每秒采集1个应力和变形值,每个试件采集数据点数5 000个左右。

根据测得数据,整理成如图6所示的不同纤维添加量、纤维长度及纤维类型试样单轴受压应力-应变全曲线,表征泡沫混凝土从开始变形、逐渐破坏到承载能力降低的整个过程,分析可知:



注:1.FRFC 0.5%; 2.FRFC 1.0%; 3.FRFC 1.5%; 4.FRFC 2.0%; 5.FC; 6.FRFC 3 mm; 7.FRFC 9 mm; 8.FRFC 19 mm; 9.FRFC丝状; 10.FRFC网状

图6 纤维泡沫混凝土应力-应变全曲线

Fig. 6 Complete stress-strain curves of FRFC

1)泡沫混凝土单轴抗压本构关系全曲线包括3个阶段:上升段、下降段和峰后段。上升段内,试样以弹性变形为主;当接近极限荷载时,应力-应变曲线斜率变小,应变增长略高。当应力超过极限荷载后,曲线迅速下降,进入下降段,此时,试样变形为塑性变形。接着进入峰后段,纤维泡沫混凝土应力-应变曲线出现波动(素泡沫混凝土为斜直线,曲线5)。

2)纤维泡沫混凝土的峰值应力对应的峰值应变减小。素泡沫混凝土峰值应变约为1.4%,而纤维泡沫混凝土的峰值应变一般在0.5%~0.7%之间。说明纤维泡沫混凝土的弹性变形比素泡沫混凝土小,即相同变形时,纤维泡沫混凝土更容易发生塑性破坏。

3)泡沫混凝土的弹性模量在添加纤维后大幅增加。如图6(a)所示,干密度600 kg/m³左右时,素泡

沫混凝土的弹性模量平均为 0.86×10^2 MPa; 添加 0.5% 的 9 mm 纤维后, 泡沫混凝土弹性模量增加到 3.8×10^2 MPa, 为素泡沫混凝土的 4 倍。此外, 纤维添加量以及纤维长度不同时, 弹性模量值存在小幅差异, 相同长度丝状和网状纤维试样的弹性模量基本相同。

4) 残余应力在添加纤维后得到不同程度提升。素泡沫混凝土残余应力为 0.86 MPa, 而添加纤维后, 残余应力大都在 1.5 MPa 以上。图 6(b) 所示的纤维长度 3 mm、含量 0.5% 的试样残余应力约为 2.4 MPa, 为素泡沫混凝土的 2.8 倍。

5) 当荷载接近极限荷载的 0.9 倍左右时, 试样开始出现断裂缝, 当荷载接近峰值时, 断裂缝不断扩展并上下贯通, 形成主裂缝, 局部还会存在竖向或横向短裂缝, 如图 6(c) 所示。另外, 纤维泡沫混

凝土峰后应力-应变曲线多呈现波动, 原因是随着应变增大, 试样内部的微裂隙逐渐增多; 到达最大承载力后, 试样承载力降低, 出现应变软化特征, 试样表面及内部裂隙逐渐贯通; 在裂隙贯通过程中, 会受到纤维的牵引作用, 从而使得承载力小幅提升; 随着裂隙不断扩张, 部分纤维与水泥浆体脱离, 使得承载力又降低, 如此反复, 引起峰后应力-应变曲线波动。

3 孔径分布及吸水性能变化

3.1 孔径分布

采用可以自动统计泡孔周长、直径等参数的三维视频显微系统(HIROX KH-3000VD), 获得泡沫混凝土试样截面的孔隙分布图, 同时, 对不同直径的泡孔数量进行统计, 结果分别如图 7 和表 2 所示。

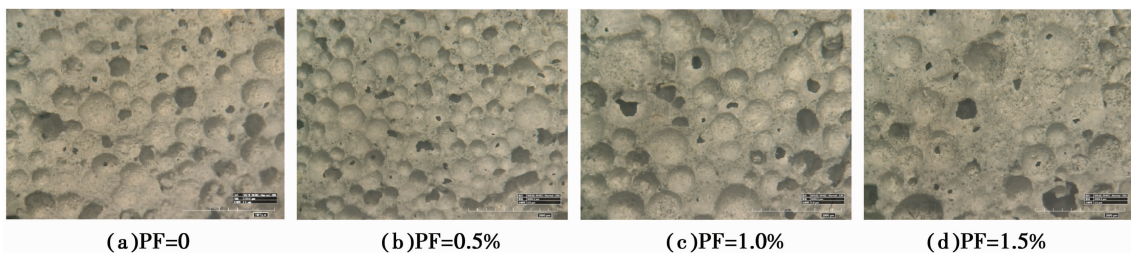


图 7 不同纤维添量时泡孔图

Fig. 7 Images of pore for different fiber contents

表 2 不同纤维添量时试样孔径分布统计

Table 2 Pore size distribution for different fiber contents

纤维添量/%	试样孔径分布/%						
	0~20 μm	20~30 μm	30~40 μm	40~50 μm	50~100 μm	100~300 μm	>300 μm
0	36.5	30.9	11.0	6.7	6.6	5.7	2.6
0.5	38.7	29.9	11.1	6.0	7.2	4.8	2.3
1.0	38.6	29.3	11.8	6.6	8.5	3.6	1.5
1.5	39.7	28.6	13.0	6.6	7.8	3.4	0.9

图 7 所示为长度 3 mm 纤维添加量分别为 0、0.5%、1.0% 和 1.5% 时的泡孔分布, 可以发现, 纤维添加量较小时, 泡孔圆度较高, 且泡孔分布相对均匀; 随着纤维添加量增大, 泡孔不再均布, 且出现泡孔塌灭现象。表 2 所示为不同泡孔直径的统计结果, 小泡孔数量随纤维添加量的增加未呈现规律变化, 纤维添加量为 0%、0.5%、1.0% 和 1.5% 时, 孔径 $< 20 \mu\text{m}$ 的泡孔数量百分比分别为 36.5%、38.7%、38.6% 和 39.7%; 孔径 100~300 μm 和大于 300 μm 的泡孔数量随纤维添加量增大而逐渐降低, 如孔径 $> 300 \mu\text{m}$ 的泡孔占比由纤维添加量 0.5% 时的 2.3% 降低到纤维添量 1.5% 时的 0.9%, 这与图 7(c) 观测到的泡孔分布图像吻合。

3.2 吸水性能变化

将添加长度 9 mm 丝状纤维后的试样置于干球温度和相对湿度分别为 30 $^{\circ}\text{C}$ 和 75% 的恒温、恒湿机内, 测试纤维添加量为 0.5%、1% 和 2% 的 3 种试样含水率随时间变化情况, 如图 8 所示。

分析发现, 纤维添加量不同的试样, 含水率随时间增加逐渐增大, 且含水率增幅随时间增加而不断降低。原因是试样与环境空气进行的是非稳态传质过程, 初始阶段, 两者水蒸气浓度差较大, 故质量传递速率相应较大。此外, 纤维添加量越高, 相同时刻内试样含水率也越大, 说明泡沫混凝土添加纤维后吸水能力得到不同程度提升。如在 20 h 时, 纤维添加量为 0.5%、1%、2% 的含水率分别为 2.19%、

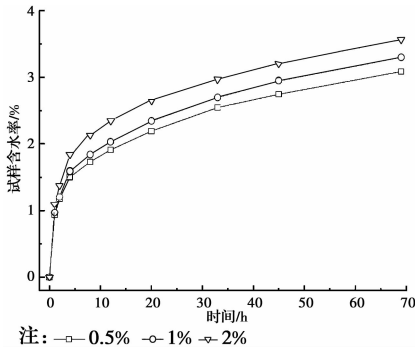


图8 含水率变化曲线

Fig. 8 Variation of water contents with time

2.35%、2.66%。由于纤维贯通了试样内部的孔隙,纤维添加量越少的试样,孔隙贯通度越低,材料含水率越低。

4 结论

1)纤维增强泡沫混凝土的抗压强度随孔隙率增加呈指数降低,水灰比对纤维增强泡沫混凝土的抗压强度的提升随纤维添加量、孔隙率不同而不同。

2)短纤维更利于提升抗压/抗拉强度,强度增幅受纤维添加量影响。当纤维添加量超过限值后,试样强度不升反降。网状纤维对试样抗压/抗拉强度的提升优于丝状纤维,纤维最优添加量与纤维长度、类型等有关。

3)纤维泡沫混凝土应力-应变全曲线中,峰值应力对应的峰值应变比素泡沫混凝土小1/2,而试样弹性模量和峰后残余应力分别提高4倍和2倍。

4)小孔径($<20 \mu\text{m}$)泡孔数量随纤维添加量的变化,未呈现规律变化,大直径($>100 \mu\text{m}$)泡孔数量随纤维添加量增大,逐渐降低;纤维泡沫混凝土的吸水性能随纤维添加量增加而增强。

参考文献:

[1] THOMAS B S, KUMAR S, AREL H S. Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material - A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 550-561.

[2] BONAKDAR A, BABBITT F, MOBASHER B. Physical and mechanical characterization of fiber-reinforced aerated concrete (FRAC) [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 38(4): 82-91.

[3] SHE W, CHEN Y Q, ZHANG Y S, et al. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1278-1291.

[4] 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.

[5] FALLIANO D, DE DOMENICO D, RICCIARDI G, et al. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 735-749.

[6] SUN Y F, GAO P W, GENG F, et al. Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials [J]. *Materials Letters*, 2017, 209: 349-352.

[7] JIANG J, LU Z Y, NIU Y H, et al. Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement [J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 949-959.

[8] PAN Z H, LI H Z, LIU W Q. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 72: 256-261.

[9] HAJIMOHAMMADI A, NGO T, MENDIS P. Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 87: 164-171.

[10] AKTHAR F K, EVANS J R G. High porosity ($>90\%$) cementitious foams [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(2): 352-358.

[11] 陈兵, 刘睫. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(3): 286-290, 340. CHEN B, LIU J. Experimental research on properties of foamed concrete reinforced with polypropylene fibers [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(3): 286-290, 340. (in Chinese)

[12] LAUKAITIS A, ZURAUSKAS R, KERIENE J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(1): 41-47.

[13] TIWARI B, AJMERA B, VILLEGAS D. Dynamic characteristics of lightweight cellular concrete [C]// *Geotechnical Frontiers*, 2017.

[14] TIWARI B, AJMERA B, MAW R, et al. Mechanical properties of lightweight cellular concrete for geotechnical applications [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(7): 06017007.

[15] 桑国臣, 朱轶韵, 杨岗, 等. 水灰比对轻质水泥基泡沫材料性能的影响 [J]. *材料科学与工程学报*, 2015, 33(3): 339-342, 323. SANG G C, ZHU Y Y, YANG G, et al. Influence of water-cement ratio on property of light weight cement based foam material [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2015, 33(3): 339-342, 323. (in Chinese)