

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.102

不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔结构

张亚梅^{1a,1b}, 孙超^{1a,1b}, 王申^{1a,1b}, 朱玉^{1a,1b}, 孙国星^{2a,2b}

(1.东南大学 a.材料科学与工程学院; b.江苏省土木工程材料重点实验室,南京 211189; 2.澳门大学 a.应用物理及材料工程研究院; b.中山大学生物无机与合成化学教育部重点实验室与澳门大学应用物理及材料工程研究院联合重点实验室,澳门 999078)

摘要:泡沫混凝土的密度等级对其性能有显著影响。笔者制备了干密度在 300~1 000 kg/m³ 范围内的泡沫混凝土,对其浆体流动度、抗压强度、吸水率和干燥收缩进行了测试,利用 X 射线计算机断层扫描成像(X-ray computed tomography, X-CT)对试件的孔结构进行表征。结果显示:随着泡沫混凝土密度等级增加,其浆体流动度先增大后减小,密度为 600 kg/m³ 时流动度最大;抗压强度随密度等级增加而逐渐增大,并与密度等级之间存在指数关系;干燥收缩和吸水率均随密度等级增加逐渐减小,这是由于其内部孔隙率降低、封闭孔增多所致。X-CT 分析结果显示,密度低于 600 kg/m³ 的泡沫混凝土内部孔隙分布不均,试件表面的大孔较多,这是由于浆体与泡沫的体积比过低、浆体无法均匀地包裹在泡沫表面所致。

关键词:泡沫混凝土;密度等级;性能;孔结构

中图分类号:TQ178

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)08-054-10

Properties and pore structure of foam concrete with different density

ZHANG Yamei^{1a,1b}, SUN Chao^{1a,1b}, WANG Shen^{1a,1b}, ZHU Yu^{1a,1b}, SUN Guoxing^{2a,2b}

(1a. School of Materials Science and Engineering; 1b. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China; 2a. Institute of Applied Physics and Materials Engineering; 2b. MOE Joint Key Laboratory by the MOE Key Laboratory of Bioinorganic and Synthetic Chemistry of Sun Yat-Sen University and Institute of Applied Physics and Materials Engineering of the University of Macau, University of Macau, Macau 999078, P. R. China)

Abstract: Density of foam concrete has a significant impact on its performance. In this study, foam concrete with dry density of 300 kg/m³ to 1 000 kg/m³ was prepared to test the slurry fluidity, compressive strength, water absorption, and drying shrinkage; and pore structures of the specimens were characterized by X-CT(X-ray computed tomography). The results showed that the fluidity of the slurry firstly increased and then decreased with the increase of the foam concrete density, and reached a maximum at 600 kg/m³. The compressive strength of the foam concrete increased gradually and there was an exponential relationship

收稿日期:2019-06-18 **网络出版日期:**2020-03-17

基金项目:南京长江大桥维修改造工程研究项目资助项目(201727002),澳门科学技术发展基金资助项目(FDCT-078/2017/A2)。

Supported by Research Project of Nanjing Yangtze River Bridge Maintenance and Renovation (201727002), and Science and Technology Development Fund from Macau(FDCT-078/2017/A2).

作者简介:张亚梅(1968—),女,东南大学教授,博士生导师,主要从事固体废弃物的资源化利用技术、碱激发胶凝材料、建筑节能新材料、高性能纤维增强水泥基复合材料、3D 打印混凝土等研究,(E-mail)ymzhang@seu.edu.cn。

between it and the density grade. The drying shrinkage and water absorption were all gradually reduced with the increase of the density due to the decrease of internal porosity and the increase of closed pores. X-CT analysis showed that the pores in the foamed concrete with a density less than 600 kg/m^3 were unevenly distributed, and there were more large pores on the surface of the specimen compared with the bulk. It is presumed that the volume ratio of the cement paste to the foam is too low for the paste to uniformly wrap the bubbles on the surface of the foam concrete.

Keywords: foam concrete; density grade; properties; pore structure

泡沫混凝土是轻质混凝土的一种,用发泡剂在水泥浆体中引入孔隙制成^[1-3]。泡沫混凝土有许多优良的性能,比如密度低($300 \sim 1\ 600 \text{ kg/m}^3$)^[4-6]、耐火性能强^[7]、导热系数低和隔声性能好^[8]。目前,泡沫混凝土已被广泛应用在隔热墙板、地面保温和路基桥涵回填等领域^[9]。

泡沫混凝土的密度等级对其力学性能有显著的影响。Falliano等^[10-11]研究了不同密度等级泡沫混凝土的抗压强度和弯曲强度,提出随着密度增加,泡沫混凝土的抗压强度和弯曲强度呈线性增加。龙文武等^[12]研究发现,随着泡沫混凝土干密度增大,其抗压强度呈二次方增加,干密度为 850 kg/m^3 的试件抗压强度是 650 kg/m^3 试件的 1.84 倍。习会峰等^[13]研究了密度为 $400 \sim 1\ 200 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土的抗压强度,提出泡沫混凝土抗压强度与其密度之间存在指数相关。目前关于泡沫混凝土密度等级与其抗压强度之间的关系还没有统一的结论。

泡沫混凝土的密度等级对其吸水率、干燥收缩和孔结构也有显著影响。周利睿等^[14]和李广良等^[15]对干密度 $600 \sim 900 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土性能进行了研究,发现泡沫混凝土的吸水率随密度增大而逐渐降低,但关于泡沫混凝土密度与其吸水率之间的函数关系目前还没有相关研究。Amran等^[3]提出泡沫混凝土的干燥收缩随密度等级的增大而逐渐降低,王建军等^[16]进一步研究了密度为 $600, 800, 1\ 000, 1\ 200 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土的干燥收缩,提出泡沫混凝土干密度与其干燥收缩之间存在线性相关。侯明显等^[18]和 Nambiar等^[18]研究发现泡沫混凝土的干密度与其孔隙率存在反比关系。庞超明等^[19]、张旭等^[20]和 Hilal等^[21]研究了泡沫混凝土的密度等级($600, 1\ 000, 1\ 400 \text{ kg/m}^3$)对其孔形貌的影响,发现随着密度等级降低,泡沫混凝土的平均等效孔径和形状因子均逐渐增大。

虽然已有不少关于泡沫混凝土密度等级及其性能的研究,但目前的相关研究涉及的密度等级较少,一般只选取 3~5 个密度等级来进行研究,很难对泡沫混凝土密度与其性能之间的规律作出细致的分析。此外,在同一密度下,泡沫混凝土的性能也受到泡沫稳定性的影响。用稳定性好的泡沫制备成的泡沫混凝土在同一密度下的性能比不稳定的泡沫所制试样高很多,利用稳定性好的泡沫制备不同密度等级的泡沫混凝土的性能规律性也更强。因此,采用一种人工合成类发泡剂(SS),在水泥浆体中产生尺寸稳定的泡沫,制备了密度等级在 $300 \sim 1\ 000 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土,测试了其浆体流动度、强度、吸水率、干燥收缩等性能,并利用(X-ray computed tomography, X-CT)对其内部的孔结构进行分析,探究试件的宏观性能与其微观结构之间的联系。

1 实验原材料及样品制备

1.1 实验原材料

采用江南-小野田水泥有限公司的 P II 52.5 水泥,比表面积为 $362 \text{ m}^2/\text{kg}$,水泥的化学成分和粒径分布分别列于表 1 和表 2 中。本研究中所用发泡剂是一种白色粉末状的人工合成类发泡剂(SS),主要成分为纳米颗粒及十二烷基磺酸钠等,产自江苏句容宜发建材有限公司。

表 1 水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of cement

氧化物	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
含量/%	63.97	20.97	4.69	3.02	0.22	0.63	2.56	0.61	0.09	3.84

表 2 水泥粒径分布

Table 2 Cement particle size distribution

粒径/ μm	4.29	5.88	7.62	11.55	15.98	19.13	22.70	28.34	37.90	44.89
比例/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95

1.2 配合比设计

泡沫混凝土的配合比主要是根据其目标密度来进行计算,这种方法适用范围较广,可以根据泡沫混凝土的设计密度、泡沫的性能进行调整。制备不同干密度的泡沫混凝土的配合比计算公式如下^[5]:

$$\rho_d = S_a m_c, \quad (1)$$

$$V_2 = K(1 - V_1) = K \left[1 - \left(\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} \right) \right], \quad (2)$$

式中: ρ_d 是泡沫混凝土的设计干密度, kg/m^3 ; S_a 为经验常数,硅酸盐水泥一般为 1.2; m_c 是水泥的质量, kg; V_1 和 V_2 分别是水泥浆体和泡沫的体积, m^3 ; 1 代表的是 1 m^3 泡沫混凝土体积, ρ_c 和 ρ_w 分别是水泥和水的密度, kg/m^3 ; m_w 是水的质量, kg; 在本研究中水灰比为 0.5^[5]; K 是和泡沫性质有关的系数,通常为 1.2~1.6,随泡沫种类和试件密度等级变化。

1.3 泡沫混凝土成型方法

在成型前,先将发泡剂与水按照 1:300 质量比搅拌均匀制成发泡液,然后将水和水泥按照表 3 中的比例混合均匀,同时将发泡液通入发泡机制成泡沫,泡沫密度为 $81 \text{ kg}/\text{m}^3$,然后按照表 3 量取指定体积的泡沫加入到水泥浆体中,利用手持搅拌机(转速 80~150 r/min)搅拌 90 s,将泡沫混凝土浆体搅拌均匀,最后将浆体浇筑到模具中,48 h 后拆模,并在标准条件下养护 28 d。

表 3 不同密度等级的泡沫混凝土配合比

Table 3 Mix of foam concrete with different density grades

密度等级	目标密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水泥/kg	水/kg	泡沫体积/ m^3	实际干密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
A03	300	250	125	0.95	308±4
A04	400	308	154	0.92	412±2
A05	500	417	209	0.89	504±7
A06	600	500	250	0.86	621±5
A07	700	583	291	0.83	718±6
A08	800	667	334	0.80	831±8
A09	900	750	375	0.77	910±7
A10	1 000	833	416	0.74	1 026±10

1.4 试验方法

1.4.1 浆体流动度

泡沫混凝土浆体的流动度会影响它的施工性能。发泡剂的种类对泡沫混凝土浆体的流动度有显著影响。本研究中参考标准 JGJ/T 341—2014《泡沫混凝土应用技术规程》的试验方法对泡沫混凝土浆体流动度进行测试,将一个内径 80 mm、高 80 mm 的两端敞开的圆柱筒放置在水平的玻璃板(500 mm×500 mm)上,将泡沫水泥浆体倒入该圆柱筒中直至装满,表面刮平,然后将圆筒垂直提起,水泥浆体会在玻璃板上向四周扩展,经过 60 s,测试浆体的最大直径即为其流动度。

1.4.2 抗压强度及吸水率

抗压强度和吸水率的测试方法参考标准 JG-T266-2011《泡沫混凝土》。在测试前,将经过 28 d 标准养护的尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的泡沫混凝土试件在 60 °C 恒温条件下烘干 24 h。利用液压伺服万能试验机对泡沫混凝土的抗压性能进行测试,加载速度为 1 kN/s。

吸水率通过吸水前后的质量变化计算得到。将干燥的泡沫混凝土浸泡在水中,48 h 后取出试件,用湿抹布擦干其表面的水分,称出试件的质量,计算质量变化率即为吸水率。

1.4.3 干燥收缩

利用 40 mm×40 mm×160 mm 的两端带铜头模具成型泡沫混凝土,经过 48 h 后拆模,放置在恒温恒湿(相对湿度 50%,25 °C)的环境中,每隔一段时间测量两端铜头的长度变化即为干燥收缩值。

1.4.4 孔结构分析

利用 X-CT 对泡沫混凝土试件二维切片及三维结构进行分析,比较 3 组泡沫混凝土的孔径和孔壁形貌。本实验研究中采用德国 YXLON Precision S 型微焦点 X-CT 进行试验,高压范围 10~225 kV,分辨率为 10 μm。

2 实验结果与分析

2.1 浆体流动度

泡沫混凝土的流动性决定了其施工的难易程度,与一般的混凝土相比,新拌的泡沫混凝土浆体具有很好的流动性。实验中对不同密度等级的泡沫混凝土新拌浆体流动度进行了测试。从图 1 可以看出,随着泡沫混凝土密度等级提高,泡沫混凝土的浆体流动度先上升后下降,在 600 kg/m³ 时浆体流动度最大。这是由于一方面泡沫中的气泡对水泥浆体起到一定的分散润滑作用^[21],另一方面泡沫中含有一定的水和表面活性剂组分(可以起到减水剂的作用),掺入适当体积会使浆体的流动度增大,而随着泡沫掺量进一步增大,泡沫混凝土中的水泥浆体无法很好地包裹泡沫,使浆体被泡沫隔开,浆体的均匀性降低,且浆体整体密度过低,以致流动度下降。

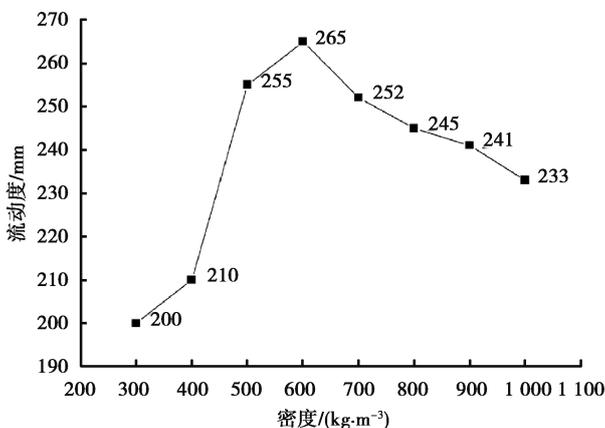


图 1 不同密度泡沫混凝土的浆体流动度

Fig. 1 Slurry fluidity of foam concrete with different densities

2.2 抗压强度

对不同密度等级的泡沫混凝土的抗压强度进行了测试,结果如图 2 所示。可以看出,随着密度增加,泡沫混凝土的 7,14,28 d 抗压强度均呈现增长趋势,且随着泡沫混凝土密度增大,强度的增长幅度也越来越高。为了确定泡沫混凝土密度等级与抗压强度之间的关系,对不同密度等级的泡沫混凝土 28 d 抗压强度进行了拟合,拟合结果如图 3 所示,拟合公式如下:

$$y = 2.04e^{(x/566.72)} - 3.32, \quad (3)$$

式中: y 为泡沫混凝土的 28 d 抗压强度; x 为泡沫混凝土的干密度。可以看出泡沫混凝土密度等级与 28 d

抗压强度之间呈现指数关系,这与习会峰等^[13]得出的结论相似。

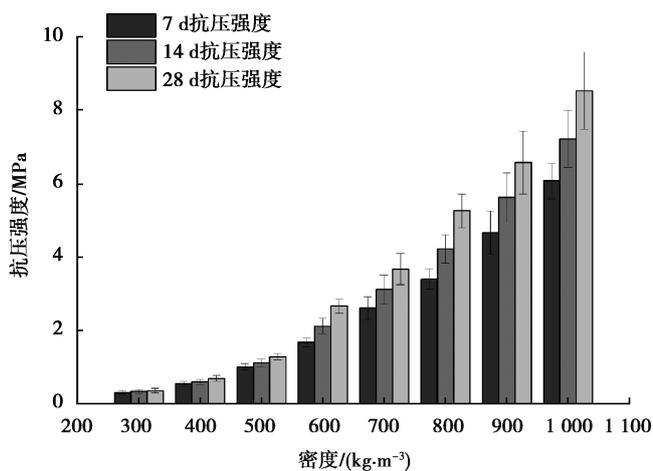


图 2 不同密度泡沫混凝土的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of foam concrete with different densities

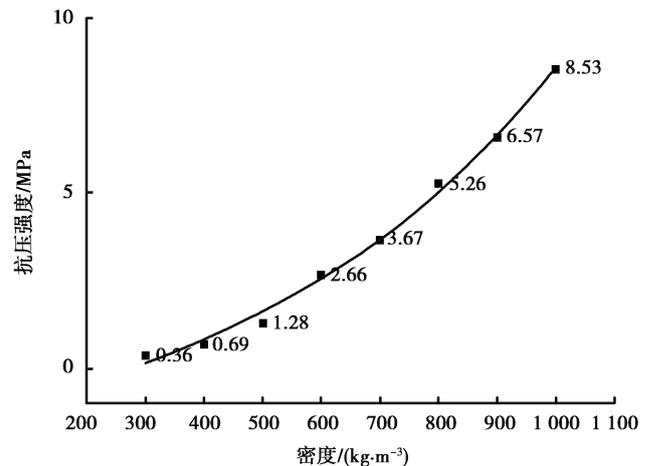


图 3 不同密度试件的 28 d 强度拟合曲线

Fig. 3 The 28 d strength fitting curve of specimens with different densities

2.3 吸水率

对不同密度的 SS 发泡剂试件进行吸水率测试的结果如图 4 所示。从图中可以看出,泡沫混凝土的吸水率随密度等级升高逐渐下降。密度等级 A03 的泡沫混凝土试件吸水率最高,为 44.6%;密度等级提高至 A06 时,泡沫混凝土吸水率为 21.7%;密度等级为 A10 的泡沫混凝土吸水率最低,为 7.4%。这是由于一方面低密度的泡沫混凝土孔隙率较高,连通孔和大孔较多,因此吸水量更大,而高密度的泡沫混凝土孔隙较少且多不连通,因此吸水量较低;另一方面低密度的泡沫混凝土泡沫用量较高,泡沫引入的水更多,因此使得水泥水化产物的密实度降低,吸水率增大。

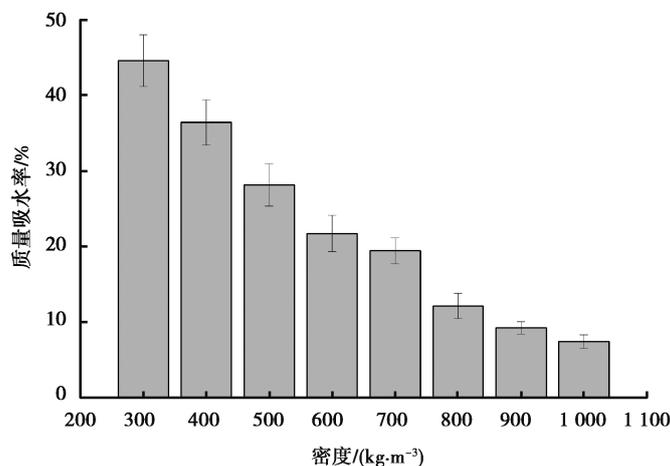


图 4 不同密度泡沫混凝土的质量吸水率

Fig. 4 Water absorption of foam concrete with different densities

为明确泡沫混凝土密度等级与吸水率之间的关系,对不同密度等级的泡沫混凝土吸水率进行了拟合,拟合结果如图 5 所示,拟合公式如下:

$$y_1 = (4.94 \times 10^{-5})x^2 - 0.12x + 75.51 \quad (300 < x < 1000), \quad (4)$$

式中 y_1 为泡沫混凝土的吸水率。可以看出泡沫混凝土密度等级与吸水率之间呈现二次函数关系,由于二次函数不是单调函数,因此这里取实验结果所在的密度等级范围为定义域。

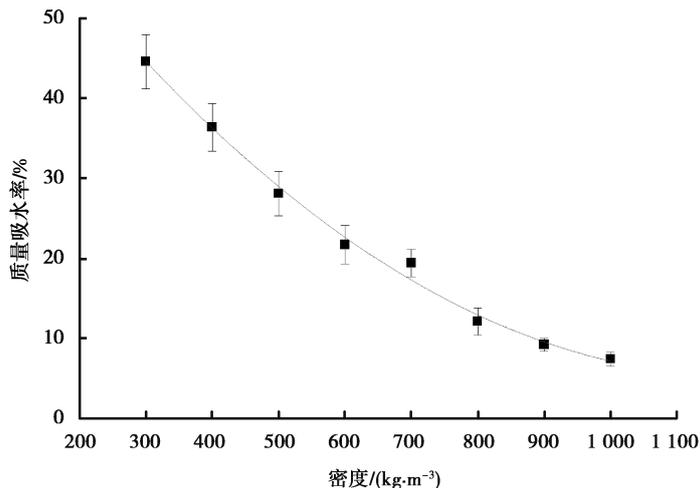


图 5 不同密度试件的质量吸水率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of mass water absorption of specimens with different densities

2.4 干燥收缩

泡沫混凝土的干燥收缩较大,是普通混凝土干燥收缩的 8 倍左右。本研究在恒温(20±1) °C、恒湿(43±2)%的条件下对不同密度等级的泡沫混凝土 90 d 干燥收缩进行了测试,结果如图 6 所示。从图中可以看出,泡沫混凝土的干燥收缩主要集中在早期,在前 14 d,泡沫混凝土的干燥收缩较大,A03、A06、A10 密度等级的泡沫混凝土干燥收缩分别为 4.78,3.17,2.28 mm/m。14 d 后泡沫混凝土的干燥收缩速率明显减缓,到 90 d 时干燥收缩变化已经不明显,A03、A06、A10 密度等级的泡沫混凝土干燥收缩分别为 6.39,4.68,3.95 mm/m。此外,泡沫混凝土的干燥收缩与其密度等级之间存在密切的联系,随着泡沫混凝土密度等级增加,泡沫混凝土的干燥收缩逐渐下降。其主要原因有两方面:一方面,由于泡沫中含有一定量的水,泡沫混凝土的密度等级越高,其泡沫的掺量越少,则泡沫引入的水也越少,导致泡沫混凝土浆体的总水灰比下降,使得干燥收缩下降;另一方面,泡沫混凝土的密度等级越高,其内部的连通孔和大孔越少,缺陷也越小,试件在干燥收缩过程中受到的内部应力越大,导致干燥收缩减小。

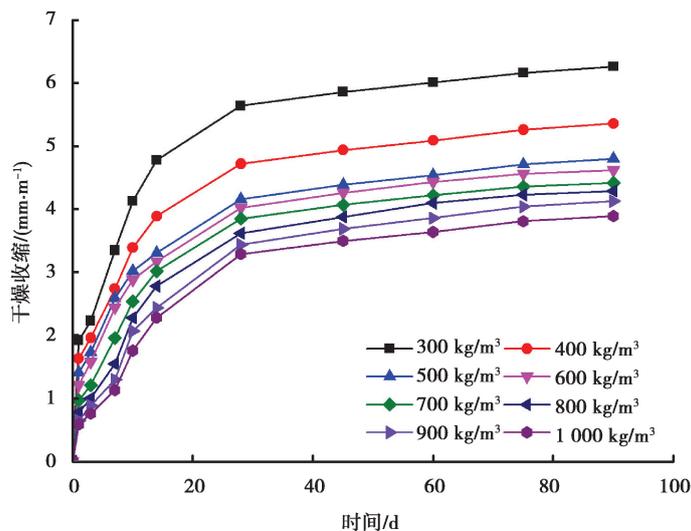


图 6 不同密度泡沫混凝土的 90 d 干燥收缩

Fig. 6 Shrinkage during 90 d drying of foam concrete with different densities

对不同密度等级的泡沫混凝土 90 d 干燥收缩进行拟合的结果如图 7 所示,拟合公式如下:

$$y_2 = (4.80 \times 10^{-6})x^2 - 0.01x + 8.39 \quad (300 < x < 1\ 000), \quad (5)$$

式中 y_2 为泡沫混凝土的干燥收缩。可以看出泡沫混凝土密度等级与 90 d 干燥收缩之间呈二次函数关系,这与之前学者研究所得出的规律不同^[16]。由于二次函数不是单调函数,因此这里取实验结果所在的密度等级范围为定义域,

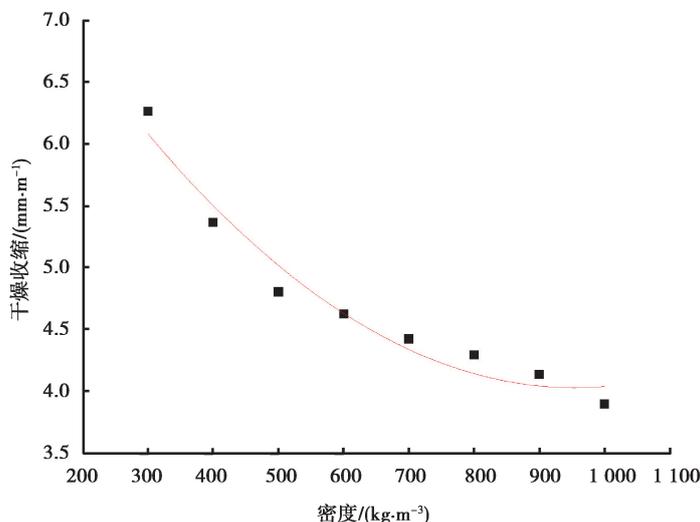


图 7 不同密度试件的 90 d 干燥收缩拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of 90 d drying shrinkage of specimens with different densities

2.5 孔结构

为了对比不同密度等级试件内部气孔尺寸和分布的差异,选择了以发泡剂 SS 制备的密度等级分别为 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 kg/m³ 的泡沫混凝土试件,并对其进行 X-CT 扫描,所得试件内部二维平面照片如图 8 所示,三维立体图像如图 9 所示。

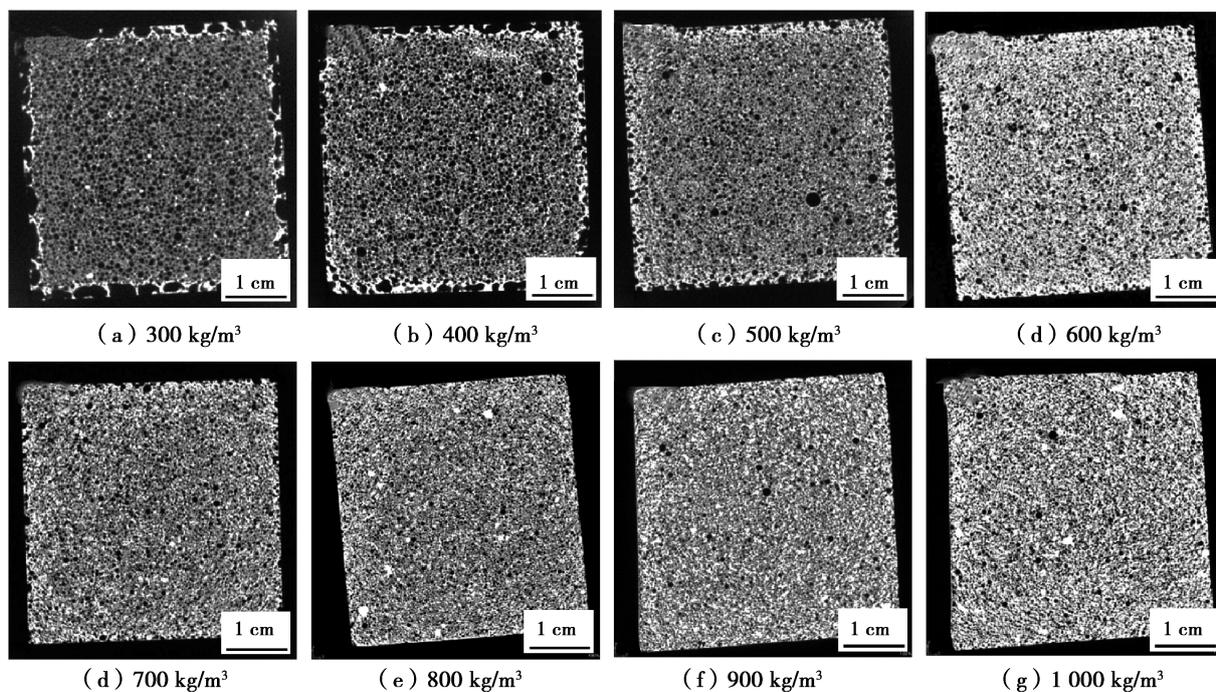


图 8 不同密度等级泡沫混凝土内部气孔大小及分布二维平面图

Fig. 8 Two-dimensional plans of pore size and distribution in foam concrete with different densities

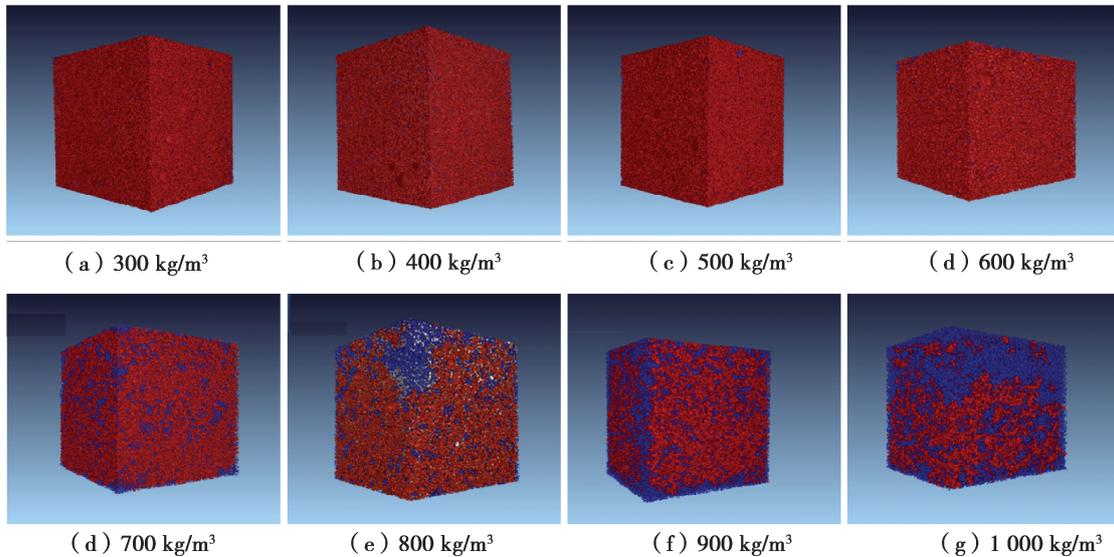


图 9 泡沫(SS发泡剂)混凝土内部 X-CT 三维立体图

Fig. 9 Three-dimensional X-CT pictures of internal structure of foam concrete with different densities

从图 8 可以看出,密度等级偏低的泡沫混凝土边界和内部气孔大小分布较不均匀,边界的气孔体积较大,内部气孔体积偏小,这一特征在密度为 300 kg/m^3 和 400 kg/m^3 的试件中较为明显,而 500 kg/m^3 和 600 kg/m^3 等中等密度试件则不存在该现象。另外,观察气孔尺寸及分布可发现,密度等级越低,泡沫混凝土内部气孔尺寸越大,气泡直径的离散性也更大;而密度等级偏高的泡沫混凝土内部气泡则趋于均匀的小孔,气孔周围的浆体形成的气孔壁也相对更厚实。这是由于密度等级较小的试件在成型中所使用胶凝材料量较少,因此用于包裹泡沫的浆体较少,导致在引入气泡的过程中气泡周围形成的气孔壁较薄。气泡壁较薄使得在拌合物浇筑硬化的过程中气泡壁易破裂,小气泡逐渐融合形成较大的气泡,并向边界移动,因而导致密度等级较低的泡沫混凝土边界气泡尺寸明显大于密度等级高的试件,且其内部气泡尺寸和分布的离散性也较大。

图 9 中红色代表孔隙体积大于 0.01 mm^3 的大孔径气孔,蓝色代表孔隙体积小于 0.01 mm^3 的小孔径气孔。可以看出,密度等级为 $300 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土内部几乎均为大孔,随着密度等级增大,试件中的大孔数量逐渐减少。不同尺寸的气孔在泡沫混凝土中的分布并不均匀,大孔主要分布在表面的边界上或是聚集在某一方向上,而小孔则主要集中在试件内部,这主要因为水泥浆与泡沫由于密度不同而没有完全混合均匀所致。

红色大孔径气孔所占比例如表 4 所示。可以看出,随着密度等级增加,泡沫混凝土的孔隙率显著下降。密度由 300 kg/m^3 增大至 1000 kg/m^3 过程中,试件的大孔占比从 99.8% 下降至 37.8% ,密度等级 A03、A04 和 A05 的试件中大孔的占比均在 90% 以上。当密度等级提升至 A06 以后,泡沫混凝土中的大孔占比明显降低,这与抗压强度和吸水率的测试结果一致,由此可知泡沫混凝土的孔结构会显著影响泡沫混凝土的性能。

表 4 各泡沫混凝土试件内大孔径占比

Table 4 Large-diameter pore ratio of foam concrete specimens

试件密度等级	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10
大孔占比/%	99.8	95.9	91.6	82.2	69.2	52.4	44.1	37.8

3 结论

笔者研究了不同密度等级泡沫混凝土的各项性能,并与微观形貌相结合进行了分析,基于实验结果得到

以下结论。

1) 密度等级对泡沫混凝土的流动性及硬化性能有显著影响。泡沫混凝土密度从 300 kg/m^3 增大到 $1\ 000 \text{ kg/m}^3$ 过程中,新拌浆体的流动度先增大后减小,密度为 600 kg/m^3 时流动度最大。

2) 随着泡沫混凝土密度等级增加,试件吸水率和干燥收缩逐渐下降,与密度等级呈现二次函数相关;抗压强度逐渐提高,且与密度等级呈指数相关。

3) 随着密度等级增加,泡沫混凝土的孔隙率显著下降。密度由 300 kg/m^3 增大至 $1\ 000 \text{ kg/m}^3$ 过程中,试件的大孔(孔体积大于 0.01 m^3)占比从 99.8% 下降至 37.8%。在密度小于 600 kg/m^3 时,试件边缘会出现较大孔,这是由于浆体含量过低,泡沫发生合并消泡所致。

致 谢

感谢南京长江大桥维修改造工程研究项目(项目编号 201727002)的资助,感谢东南大学交通设计研究院、江苏博特新材料有限公司、武汉二航特种公司对本研究工作的支持。感谢澳门科学技术发展基金(FDCT-078/2017/A2)的资助。

参考文献:

- [1] 肖红庆, 汤蕊瞳. 浅析新型混凝土制备及其特点[J]. 山西建筑, 2019, 45(8): 95-96.
XIAO Hongqing, TANG Ruitong. Analysis on the new concrete preparation and its characteristics [J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(8): 95-96.(in Chinese)
- [2] Zhang Z H, Provis J L, Reid A, et al. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction[J]. Construction and Building Materials, 2014, 56: 113-127.
- [3] Amran Y H M, Farzadnia N, Ali A A A. Properties and applications of foamed concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990-1005.
- [4] 胡验君, 苏振国, 杨金龙. 建筑外墙外保温材料的研究与应用[J]. 材料导报, 2012, 26(S2): 290-294.
HU Yanjun, SU Zhenguo, YANG Jinlong. Research status and application of external wall thermal insulation materials[J]. Materials Review, 2012, 26(S2): 290-294.(in Chinese)
- [5] 李应权, 朱立德, 李菊丽, 等. 泡沫混凝土配合比的设计[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 1-5,90.
LI Yingquan, ZHU Lide, LI Juli, et al. Study on mix ratio design of foamed concrete[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2011, 26(2): 1-5,90.(in Chinese)
- [6] Ma C, Chen B. Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 160-168.
- [7] 方永浩, 王锐, 庞二波, 等. 水泥-粉煤灰泡沫混凝土抗压强度与气孔结构的关系[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 621-626.
FANG Yonghao, WANG Rui, PANG Erbo, et al. Relationship between compressive strength and air-void structure of foamed cement-fly ash concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 621-626.(in Chinese)
- [8] Li P W, Wu H J, Liu Y C, et al. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 529-542.
- [9] Harith I K. Study on polyurethane foamed concrete for use in structural applications[J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 79-86.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 龙文武. 泡沫混凝土力学性能及其数值模拟[D]. 湖南衡阳: 南华大学, 2016.
LONG Wenwu. Mechanical properties of foamed concrete and its numerical simulation [D]. Hengyang, Hunan: University of South China, 2016.(in Chinese)
- [13] 习会峰, 刘逸平, 马宏伟, 等. 泡沫混凝土抗压强度和导热系数的实验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(2): 77-79.

- XI Huifeng, LIU Yiping, MA Hongwei, et al. Experimental research on compressive strength and thermal conductivity of foamed concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2016(2): 77-79.(in Chinese)
- [14] 周利睿, 耿飞, 刁雨同, 等. 气孔结构对泡沫混凝土吸水率和抗压强度的影响[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(7): 71-75.
ZHOU Lirui, GENG Fei, XI Yutong, et al. Effect of pore structure on the water absorption and compressive strength of foam concrete[J]. *New Building Materials*, 2017, 44(7): 71-75.(in Chinese)
- [15] 李广良, 郭伟国, 赵融, 等. 轻质泡沫混凝土的力学性能与唯象本构模型[J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(3): 428-431.
LI Guangliang, GUO Weiguo, ZHAO Rong, et al. Mechanical properties and phenomenological constitutive model of lightweight foamed concrete[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, 30(3): 428-431.(in Chinese)
- [16] 王建军, 饶秋生, 贾淑明, 等. 泡沫混凝土收缩性能试验研究[J]. *兰州工业学院学报*, 2014, 21(2): 31-34.
WANG Jianjun, RAO Qiusheng, JIA Shuming, et al. Experimental study on the shrinkage of foamed concrete[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2014, 21(2): 31-34.(in Chinese)
- [17] 侯明显, 朱先昌, 李国青, 等. 泡沫混凝土的研究与应用概述[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(2): 410-416.
HOU Mingyu, ZHU Xianchang, LI Guoqing, et al. Review on the research and application of foam concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(2): 410-416.(in Chinese)
- [18] Nambiar E K K, Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(2): 221-230.
- [19] 庞超明, 王少华. 泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1): 93-98.
PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1): 93-98.(in Chinese)
- [20] 张旭, 王武祥, 杨鼎宜, 等. 泡沫混凝土孔结构特征及其影响因素研究进展[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(7): 63-68.
ZHANG Xu, WANG Wuxiang, YANG Dingyi, et al. Characteristic on pore structure of foamed concrete and study development of its effecting factors[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(7): 63-68.(in Chinese)
- [21] Hilal A A, Thom N H, Dawson A R. On entrained pore size distribution of foamed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 227-233.

(编辑 罗 敏)