

文章编号:1007-9629(2024)07-0653-06

低吸湿泡沫混凝土的设计及物理性能

杨刚¹, 吕彦松¹, 曾广鸿², 李晓梅¹, 李庚英^{3,*}

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京 101100; 2. 广东慧图资环科技发展有限公司, 广东 广州 510510;
3. 华南农业大学 水利与土木工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:为了构筑低吸湿泡沫混凝土并再生利用热解污泥,以表观密度、导热系数和 28 d 抗压强度为指标,采用正交设计试验确定了热解污泥粉、甲基硅醇钠和纳米二氧化硅的合理掺量,进而研究了最优组合泡沫混凝土的物理性能。结果表明:以表观密度和导热系数为衡量指标时,热解污泥粉、甲基硅醇钠和纳米二氧化硅的合理掺量分别为 30%、1.5%、3.0%,而以 28 d 抗压强度为衡量指标时,三者的合理掺量分别为 10%、0.5%、3.0%;1.5% 的甲基硅醇钠使得泡沫混凝土的吸湿性降低了 90.6%~95.5%;最优组合泡沫混凝土的导热系数、表观密度和强度满足 FC5 自保温泡沫混凝土的基本要求。

关键词:正交设计;泡沫混凝土;吸湿性;热解污泥;甲基硅醇钠

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.011

Design and Physical Properties of Foamed Concrete with Low Hygroscopicity

YANG Gang¹, LÜ Yansong¹, ZENG Guanghong², LI Xiaomei¹, LI Gengying^{3,*}

(1. Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 101100, China; 2. Guangdong Huitu Resources and Environmental Technology Development Co., Ltd., Guangzhou 510510, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to construct the foamed concrete with low hygroscopicity meanwhile to recycle pyrolysis sludge ash (PSA) effectively, the reasonable dosage of PSA, sodium methyl-silanol (SMS) and nano-SiO₂ was studied by using orthogonal design in which the apparent dry density, thermal conductivity and 28 d compressive strength were set as the measuring indicators. Then the physical properties of the foamed concrete with optimal proportion were investigated. The results show that, if setting the apparent dry density and thermal conductivity as the measuring indicators, the reasonable dosage of PSA, SMS and nano-SiO₂ are 30%, 1.5% and 3.0%, respectively. If taking the 28 d compressive strength as the measuring indicator, the reasonable dosage of these three raw materials are 10%, 0.5% and 3.0% respectively. In addition, the results show the addition of 1.5% SMS reduces the hygroscopicity of the foamed concrete by 90.6%~95.5% as compared to the control one without SMS. The thermal conductivity, density and strength of the foamed concrete with optimal proportion meet the basic requirements of FC5 self-insulating blocks.

Key words: orthogonal design; foamed concrete; hygroscopicity; pyrolytic sludge; sodium methyl-silanolate

建筑能耗高达总能耗的 40%^[1],泡沫混凝土具有优良的耐燃、保温和耐候性,可有效降低建筑物的能

耗^[2-5]。但是,泡沫混凝土吸湿性大,影响其在潮湿环境中的使用。由于水的导热系数是空气的 2.5 倍,水

收稿日期:2023-09-19; 修订日期:2023-11-16

基金项目:广东省普通高校重点领域专项及创新团队项目(2019KZDZX2001,2023KCXTD005);国家自然科学基金面上项目(52178209)

第一作者:杨刚(1980—),男,湖北孝感人,中交路桥建设有限公司高级工程师,硕士.E-mail:371681108@qq.com

通讯作者:李庚英(1970—),女,湖南邵东人,华南农业大学教授,博士生导师,博士.E-mail:ligengying@scau.edu.cn

含量每增加1%,导热系数提高25%^[6],因此有必要降低泡沫混凝土的吸湿性.有机硅憎水剂可以有效降低水泥基材料的吸湿性^[7-9],但是其对泡沫混凝土强度的影响尚不清晰.

中国每年污泥产量约20亿t,利用率低.研究表明,经热解处理后的污泥密度低,含有一定的玻璃相^[10],可以代替部分水泥来生产保温材料,实现热解污泥的再生利用^[11].但是,热解污泥比表面积大、活性低、水化速度慢、吸水性强,其掺入后将导致复合材料的物理力学性能过低^[11].为了减少热解污泥对泡沫混凝土的负面影响,本文利用纳米二氧化硅的胶凝特性和晶核作用^[12-14]来提高热解污泥中硅铝组分的水化速度.

本文首先利用正交设计试验,以表观密度、导热系数和28d抗压强度为衡量指标,探究热解污泥、甲基硅醇钠和纳米二氧化硅的合理掺量及其影响规律,进而研究优组合下泡沫混凝土的强度发展规律、表观密度、吸湿性和干缩性,以期提高泡沫混凝土的应用范围并为实现热解污泥的高值利用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

采用P·O 42.5R型水泥,其3、28d抗压强度分别为22.5、46.8 MPa;热解污泥,其中CaO、SiO₂和Al₂O₃的总含量¹⁾为67.2%,X射线衍射(XRD)分析显示热解污泥中含有莫来石,将热解污泥烘干后进行筛分,粒径小于75 μm的颗粒占污泥总质量的85%~90%,比表面积为1 007 m²/kg;纳米二氧化硅,比表面积为200 m²/g,平均粒径为30 nm.水泥、热解污泥和纳米二氧化硅的化学组成见表1.市售雷邦士表面活性发泡剂,发泡倍数为42倍,1 h沉降率为32.7%;稳泡剂采用羟乙基纤维素粉末,黏度为10万 mm²/s;聚羧酸高效减水剂(粉末),减水率为45%;甲基硅醇钠(液体),固含量为35%.

表1 水泥、热解污泥和纳米二氧化硅的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of cement, pyrolytic sludge and nano-SiO₂

Unit: %									
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	IL
Cement	18.3	4.5	2.3	62.4	2.1	3.5	1.5	0.3	2.6
Sludge	15.7	7.2	11.7	44.3	2.7	5.7			6.1
nano-SiO ₂	99.5								

1)文中涉及的含量、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

1.2 试验方法

采用发泡机将发泡剂水溶液制成泡沫,按设定配合比首先干拌1 min,加入水和发泡剂慢拌1 min,加入稳泡剂和减水剂快拌2 min后,加入甲基硅醇钠再慢拌1 min,获得搅拌均匀的浆料,成型后在标准条件下养护3 d后脱模,采用保鲜膜覆盖,湿养护7 d,而后定期浇水保持试件湿润直到测试前2 d.

强度测试方法参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》执行.干燥收缩率测试参照GB/T 29417—2012《水泥砂浆和混凝土干燥收缩开裂性能试验方法》,试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm.表观密度和导热系数测试按照JG/T 266—2011《泡沫混凝土》实施,测试结果取平均值.吸湿性按GB/T 35166—2017《建筑材料及制品的湿热性能吸/放湿性能的测定 湿度反应法》测试,采用硝酸钾饱和盐溶液控制环境相对湿度为90%±5%,温度为25℃,试件静置到规定时间后取出测试其吸湿量.微观分析采用GeminiSEM300场发射扫描电子显微镜(SEM),观察前对样品镀金处理.

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果分析

根据JGJ/T 341—2014《泡沫混凝土应用技术规程》进行配合比设计,水胶比为0.35,胶凝材料用量为750 kg/m³,发泡剂的用量为1.19 kg/m³;稳泡剂羟乙基纤维素用量为0.16%;聚羧酸高效减水剂的用量为0.4%.正交试验方案如表2所示,三因素取热解污泥粉掺量(A)、甲基硅醇钠掺量(B)和发泡剂掺量(C),其中热解污泥粉以等质量代替10%、20%和30%的水泥.

表2 正交试验方案
Table 2 Scheme of orthogonal test

Level	w(sludge)/%	w(sodium methyl-silanolate)/%	w(nano-SiO ₂)/%
1	10	0.5	1.0
2	20	1.0	3.0
3	30	1.5	5.0

以表观密度、导热系数和28d抗压强度为衡量指标,采用正交设计,通过分析极差R确定优组合,结果如表3、4所示,表4中k₁、k₂、k₃分别为因素A、B、C在各个水平下的指标总和.由表3、4可见:就表观密度和导热系数而言,各因素的影响顺序为甲基

硅醇钠>热解污泥粉>纳米二氧化硅;对28 d抗压强度而言,各因素的影响顺序为热解污泥粉>纳米二氧化硅>甲基硅醇钠; $A_3B_3C_3$ 具有最低的表观密度和导热系数, $A_1B_1C_1$ 具有最高的28 d抗压强度.这表明,热解污泥粉和甲基硅醇钠的掺入会降低泡沫混凝土的28 d抗压强度和表观密度,但是对提高保温性能有积极作用.热解污泥粉本身活性不高,主要通过微集料物理填充效应堆积于泡沫混凝土内部.随着其取代水泥掺量的提升,将稀释泡沫混凝土系

统的整体C-S-H凝胶产量,并导致内部缺陷的增加,因此会对材料强度产生负面影响.表3和表4还表明,采用3.0%的纳米二氧化硅有利于提高泡沫混凝土的各项性能.纳米二氧化硅具有较强的火山灰活性和成核效应,会影响泡沫混凝土的力学性能;同时还能填充孔洞,从而细化混凝土内部孔隙结构,提升其性能.但是,纳米二氧化硅颗粒细小、比表面积较大,过多的掺入将导致浆体流动性大幅度下降^[13-14],对泡沫混凝土的物理力学性能有负面影响.

表3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal test results

Mix No.	A	B	C	Apparent density/(g·cm ⁻³)	Compressive strength(28 d)/MPa	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
A ₁ B ₁ C ₁	1	1	1	0.940	7.98	0.357
A ₁ B ₂ C ₃	1	2	3	0.902	7.38	0.335
A ₁ B ₃ C ₂	1	3	2	0.866	6.59	0.289
A ₂ B ₁ C ₃	2	1	3	0.924	7.05	0.343
A ₂ B ₂ C ₂	2	2	2	0.881	6.69	0.288
A ₂ B ₃ C ₁	2	3	1	0.812	5.01	0.267
A ₃ B ₁ C ₂	3	1	2	0.889	6.66	0.295
A ₃ B ₂ C ₁	3	2	1	0.877	5.93	0.291
A ₃ B ₃ C ₃	3	3	3	0.808	4.55	0.260

表4 正交试验极差分析
Table 4 Range analysis of orthogonal test results

Apparent density				Thermal conductivity				Compressive strength(28 d)			
Parameter	A	B	C	Parameter	A	B	C	Parameter	A	B	C
k1	0.327	0.332	0.305	k1	0.318	0.276	0.259	k1	8.260	7.200	6.410
k2	0.299	0.305	0.291	k2	0.238	0.247	0.249	k2	6.970	6.960	7.200
k3	0.282	0.271	0.313	k3	0.205	0.238	0.252	k3	5.490	6.570	7.110
R	0.045	0.061	0.022	R	0.113	0.038	0.010	R	2.770	0.630	0.790
Impact weight	B>A>C			Impact weight	B>A>C			Impact weight	A>C>B		
Optimal mix	A ₃ B ₃ C ₂			Optimal mix	A ₃ B ₃ C ₂			Optimal mix	A ₁ B ₁ C ₂		

为了定量分析泡沫混凝土导热系数、28 d抗压强度与表观密度的关系,本文对表4中的测试结果进行了拟合,如图1所示.由图1可知:28 d抗压强度与表观密度基本符合正向线性关系^[15],其相关系数 R^2 值为0.906 5;导热系数与表观密度的线性关系较弱,采用线性拟合时,其 R^2 值为0.880 2,而采用二次函数拟合时, R^2 值为0.941 1,说明导热系数与表观密度之间更符合二次函数关系,即过高和过低的表观密度都会增加泡沫混凝土的导热性.泡沫混凝土的导热性主要由水泥石传导导热、气体传导导热和辐射、对流导热决定.由于水泥的导热系数比空气大,当密度过高时,内部孔和空气含量较少,材料的导热性较好;当密度过低时,材料内部的孔含量达到或超过渗透阈值,部分微细孔连通形成大孔和开口孔,空气形成

了对流,增加了对流和辐射导热,导热系数增加^[2].因此,多孔保温材料的导热性与孔隙率之间为非线性关系,只有当传导导热、辐射导热和对流导热三者之和最小时,才具有最低的导热性.

2.2 优组合的强度发展规律

根据正交设计结果可知,当采用表观密度、导热系数和28 d抗压强度作为衡量指标时,最优组合分别为 $A_3B_3C_2$ 和 $A_1B_1C_2$.为了获得综合性能较理想的配合比,分析了这2种组合的抗压和抗折强度发展规律,结果如表5所示.同时,为了探究甲基硅醇钠的引气作用和憎水效果,本文还对比研究了未掺甲基硅醇钠组合 $A_3B_0C_2$ 和 $A_1B_0C_2$ 的力学性能,结果也列于表5.

由表5可见,各龄期下 $A_1B_1C_2$ 的抗压和抗折强度

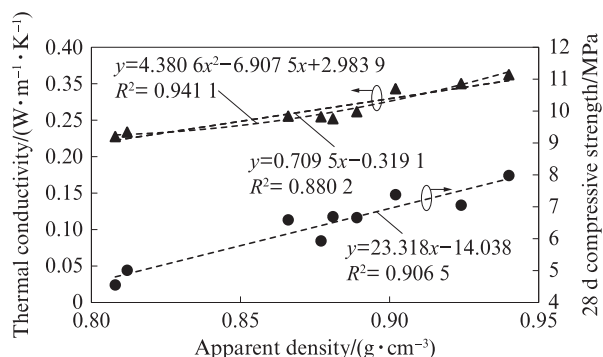


图1 导热系数、28 d抗压强度与表观密度的关系

Fig. 1 Relationship between thermal conductivity, 28 d compressive strength and apparent density

明显高于 $A_3B_3C_2$, 这是由于热解污泥粉的掺量会影响泡沫混凝土的力学性能, 其掺量越高则泡沫混凝土强度越低。

甲基硅醇钠具有一定的引气作用, 图2为未掺发泡剂的 $A_3B_3C_2$ 和 $A_3B_1C_2$ 的外观形貌图。由图2可见, 掺1.5%甲基硅醇钠试件(无发泡剂)的孔含量明显比掺0.5%甲基硅醇钠的试件多, 其SEM图中

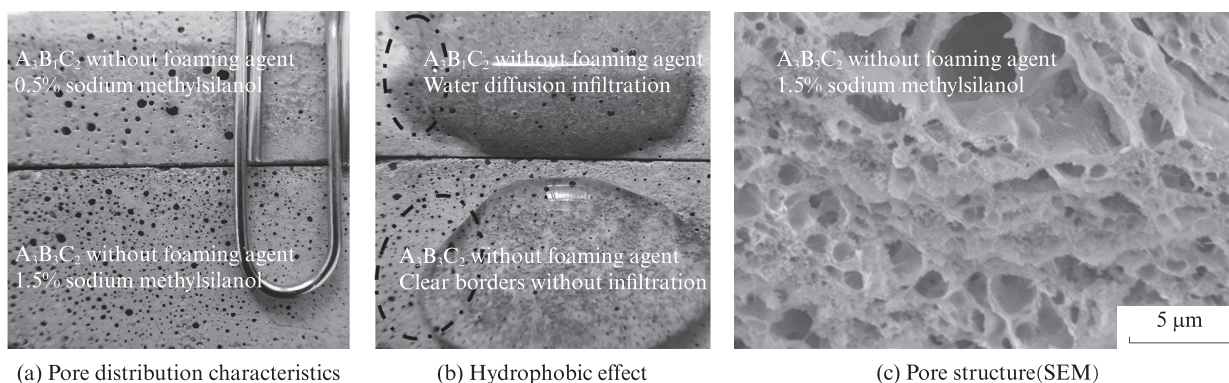


图2 甲基硅醇钠的引气作用和憎水效果

Fig. 2 Entraining-air and hydrophobic effect of sodium methyl-silanolate

由表5还可看出: 各组强度发展规律基本符合水泥的水化规律, 即早期发展速度较快, 后期发展速度较慢; 热解污泥粉和甲基硅醇钠对抗压强度的影响远超抗折强度, 并且其掺量越多, 影响越大。虽然热解污泥粉和甲基硅醇钠均降低了泡沫混凝土的强度, 但是优组合 $A_3B_3C_2$ 和 $A_1B_1C_2$ 的28 d抗压强度仍超过5.0 MPa, 满足FC5等级自保温泡沫混凝土的技术要求。因此, 采用30%热解污泥、3.0%纳米二氧化硅和1.5%甲基硅醇钠制备的泡沫混凝土可以作为自保温泡沫混凝土使用。

2.3 吸湿性研究

吸湿性影响泡沫混凝土在潮湿环境中的保温效果, 本文利用甲基硅醇钠来降低泡沫混凝土的吸湿性。泡沫混凝土的吸湿性和热工特性如表6所示。

表5 优组合及未掺甲基硅醇钠时泡沫混凝土的抗压和抗折强度

Table 5 Compressive and flexural strength of foamed concretes with or without sodium methyl-silanolate

Mix No.	Compressive strength/MPa				Flexural strength/MPa			
	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
$A_3B_3C_2$	3.74	5.39	7.01	8.51	1.15	1.61	2.17	2.33
$A_3B_0C_2$	4.12	6.08	7.75	9.84	1.19	1.75	2.23	2.58
$A_1B_1C_2$	5.85	8.82	10.31	11.96	1.69	2.43	2.86	3.03
$A_1B_0C_2$	6.49	9.03	10.45	12.04	1.82	2.53	2.92	3.11

也能观察到材料内部存在大量的孔洞。根据混凝土材料学可知, 孔隙率越高则材料的强度越低, 因此掺入甲基硅醇钠可能会降低泡沫混凝土的强度。但是, 表4中甲基硅醇钠的极差结果表明适量的甲基硅醇钠可以增强保温效果且对强度的负面作用较小, 比如 B_2 (1.0%甲基硅醇钠) 与 B_3 (1.5%甲基硅醇钠) 导热系数的极差非常接近, 而 B_2 强度极差高于 B_3 , 因此, 采用适量的甲基硅醇钠有望改善泡沫混凝土的各项性能, 其合理用量、作用机理和影响因素值得系统研究。

由表6可知: 甲基硅醇钠可以有效降低泡沫混凝土的吸湿性, 未掺甲基硅醇钠的 $A_3B_0C_2$ 吸湿性分别为0.022、0.057、0.096 kg/kg, 掺1.5%甲基硅醇钠的泡沫混凝土 $A_3B_3C_2$ 在25℃硝酸钾饱和盐溶液环境中存放3、7、28 d后的吸湿性仅为0.001、0.004、0.009 kg/kg, 比 $A_3B_0C_2$ 低90.6%~95.5%; 掺0.5%甲基硅醇钠泡沫混凝土 $A_1B_1C_2$ 的吸湿性比 $A_1B_0C_2$ 低61.5%~75.3%。这表明甲基硅醇钠可有效降低泡沫混凝土的吸湿性, 且其掺量越高, 作用效果越显著。这是由于甲基硅醇钠是一种憎水剂, 可以降低泡沫混凝土的亲水性^[7-9]。由图2(b)可见, 掺1.5%甲基硅醇钠试件 $A_3B_3C_2$ (无发泡剂) 的固体/水界面清晰, 无浸润和弥散现象, 而掺0.5%甲基硅醇钠试件 $A_3B_1C_2$ (无发泡剂) 的固体/水界面存在明显的浸润和弥散

表6 泡沫混凝土的吸湿性和热工特性
Table 6 Hygroscopicity and thermal characteristics of foamed concrete

Mix No.	Hygroscopicity/(kg·kg ⁻¹)			Apparent density/(g·cm ⁻³)	Porosity(by volume)/%	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
	3 d	7 d	28 d			
A ₃ B ₃ C ₂	0.001	0.004	0.009	0.815±0.027	67.2	0.235±0.009
A ₃ B ₀ C ₂	0.022	0.057	0.096	0.929±0.032	62.3	0.350±0.011
A ₁ B ₁ C ₂	0.008	0.011	0.020	0.918±0.045	67.0	0.343±0.015
A ₁ B ₀ C ₂	0.021	0.043	0.081	1.003±0.071	64.4	0.401±0.022

现象.

由表6还可看出:A₃B₃C₂具有最低的导热系数,其次是A₁B₁C₂,而A₁B₀C₂的导热系数最大,达到了0.401 W/(m·K),即0.5%和1.5%的甲基硅醇钠使得泡沫混凝土的导热系数分别降低了16.9%和37.0%;甲基硅醇钠能显著提高泡沫混凝土的孔隙率,降低其表观密度,A₃B₃C₂和A₁B₁C₂的孔隙率分别比未掺甲基硅醇钠时提高了4.9%和2.6%.孔隙率的增加对提高复合材料的保温性能起积极作用,因此A₃B₃C₂和A₁B₁C₂具有比A₃B₀C₂和A₁B₀C₂更好的保温效果.

2.4 干缩性研究

A₃B₃C₂、A₁B₁C₂、A₃B₀C₂和A₁B₀C₂的干缩性如图3所示.由图3可知:所有试件的早期干缩变形均较显著,养护180 d后趋于稳定;4组配合比中A₃B₀C₂的干缩性最大,而A₁B₁C₂的干缩性最小.泡沫混凝土的收缩变形主要为干燥收缩,其主要影响因素包括孔隙率、环境湿度和吸湿性,通常孔隙率越大、环境湿度变化越快、吸湿性越高,泡沫混凝土的干缩性越大.由于A₃B₃C₂、A₁B₁C₂具有比A₃B₀C₂、A₁B₀C₂更低的吸湿性,因此A₃B₃C₂、A₁B₁C₂的干缩性低于A₃B₀C₂、A₁B₀C₂.此外,泡沫混凝土的收缩变形还包括化学变形、徐变和应力引起的收缩变形.由于热解污泥粉中存在较多水化速度较慢的硅铝组分,在养护过程中会产生化学收缩,其掺量越多则化学收缩越大.其孔含量和泡沫混凝土本身的承载能力也会影响其收缩变形,孔越多则强度越低,由徐变、温度和应力引起的变形也会越大.由于A₃B₃C₂具有比

A₁B₁C₂更多的热解污泥粉、更高的孔隙率和更低的强度,因此,虽然A₃B₃C₂的吸湿性低于A₁B₁C₂(见表6),但是A₃B₃C₂的收缩变形略高于A₁B₁C₂.

3 结论

(1)正交设计试验表明甲基硅醇钠能显著影响泡沫混凝土的导热性,热解污泥粉能显著影响泡沫混凝土的强度.以表观密度和导热系数为衡量指标时,热解污泥粉、甲基硅醇钠和纳米二氧化硅的合理掺量分别为30%、1.5%和3.0%,而以28 d抗压强度为衡量指标时,3种原材料合理掺量分别为10%、0.5%和3.0%.

(2)甲基硅醇钠具有引气作用,可增强泡沫混凝土的保温效果,掺0.5%和1.5%的甲基硅醇钠可使泡沫混凝土的孔隙率分别增加2.6%、4.9%,导热系数分别降低16.9%、37.0%.

(3)甲基硅醇钠具有强憎水作用,掺0.5%和1.5%甲基硅醇钠保温材料的3~28 d吸湿性分别降低了61.5%~75.3%和90.6%~95.5%.

(4)采用优组合的配合比时,泡沫混凝土的28 d抗压强度超过5.0 MPa,干缩性和导热系数均满足FC5自保温泡沫混凝土的基本要求,因此,利用30%热解污泥粉、1.5%甲基硅醇钠和3.0%纳米二氧化硅可以构建低吸湿泡沫混凝土.

参考文献:

- [1] SONG R Z, LIU D, PAN Y Q, et al. Container farms: Energy modeling considering crop growth and energy-saving potential in different climates[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 1-13.
- [2] 陈士博. 泡沫混凝土孔结构测试与图像分析法应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
CHEN Shibao. Research on pore structure tests and image analysis method application for foamed concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [3] 党钧陶, 汤小松, 肖建庄, 等. 碱激发泡沫混凝土早期稳定行为及机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7): 746-754.
DANG Juntao, TANG Xiaosong, XIAO Jianzhuang, et al. Early

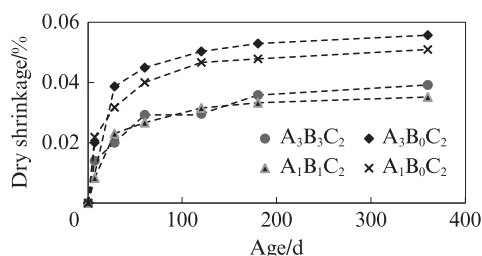


图3 泡沫混凝土的干缩性

Fig. 3 Dry shrinkage performance of foamed concrete

- stabilization behavior and mechanism of alkali-activated foamed concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):746-754. (in Chinese)
- [4] 张磊, 张静, 张颖, 等. 生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3):589-595. ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological based foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):589-595. (in Chinese)
- [5] JERMAN M, KEPPERT M, VYBORNÝ J, et al. Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes[J]. Cement Wapno Beton, 2011, 16(1):18-29.
- [6] 吴国振. 影响保温工程热损失的因素分析[J]. 节能技术, 1999, 17(5):7-8, 21. WU Guozheng. Analyzing factor on heat lose of thermal insulating engineering[J]. Energy Conservation Technology, 1999, 17(5):7-8, 21. (in Chinese)
- [7] 孙广平, 朱洪威, 程军旺, 等. 有机硅憎水剂对透水混凝土性能影响研究[J]. 公路, 2023, 68(4):330-336. SUN Guangping, ZHU Hongwei, CHENG Junwang, et al. Research on the effect of organic silicon hydrophobic agent on performance of pervious concrete[J]. Highway, 2023, 68(4):330-336. (in Chinese)
- [8] 李光辉, 宋鸽. 硅烷基聚合物防水粉末对早强砂浆性能影响的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37(4):69-73, 111. LI Guanghui, SONG Ge. Experimental research on effect of silane-based polymer powder on properties of early-strength mortar[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2023, 37(4):69-73, 111. (in Chinese)
- [9] 李书进, 钱红萍, 黄小红, 等. 憎水剂对蒸压加气混凝土吸水特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):970-974, 980. LI Shujin, QIAN Hongping, HUANG Xiaohong, et al. Effect of water repellent on the water absorption properties of autoclaved aerated concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):970-974, 980. (in Chinese)
- [10] LI Q, ZHONG Z P, DU H R, et al. Influence of silica-aluminum materials on heavy metals release during paper sludge pyrolysis: Experimental and theoretical studies[J]. Waste Management, 2023, 170:177-192.
- [11] WANG X Q, YU X W, LI Z Q, et al. Dynamic responses of a waste sludge modified by magnesium-cement-based multiphase cementitious material under influences of temperature and moisture cycles[J]. Construction and Building Materials, 2023, 402:133054.
- [12] YU J, ZHANG M, LI G Y, et al. Using nano-silica to improve mechanical and fracture properties of fiber-reinforced high-volume fly ash cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239:117853.
- [13] 姜骞, 谢德擎. 纳米二氧化硅透水混凝土新拌流变及硬化性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6):866-871. JIANG Qian, XIE Deqing. Rheological and hardened properties of nanosilica blended pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):866-871. (in Chinese)
- [14] 罗素蓉, 林倩, 李炜源, 等. 纳米材料改性再生骨料混凝土断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(11):1151-1159. LUO Surong, LIN Qian, LI Weiyuan, et al. Fracture performance of recycled aggregate concrete modified with nanomaterials[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1151-1159. (in Chinese)
- [15] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: Microstructure, properties, and materials[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [16] 徐晶, 王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8):1053-1058. XU Jing, WANG Xianzhi. Effect of nano-silica modification on interfacial transition zone in concrete and its multiscale modelling[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(8):1053-1058. (in Chinese)
- [17] 杜渊博, 葛勇. 水泥石导热系数的计算模型[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2):466-472. DU Yuanbo, GE Yong. Modeling of effective thermal conductivity of cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2):466-472. (in Chinese)