

# 路用泡沫混凝土微观孔隙结构特性影响研究

蔡军<sup>1</sup>, 匡渝阳<sup>2,3</sup>

(1. 青海省公路局, 青海 西宁 810008; 2. 浙江交工新材料有限公司; 3. 浙江大盈建设有限公司)

**摘要:** 泡沫混凝土的物理特性受其微观孔隙结构的影响。该文利用扫描电镜和 Image 软件对 4 组冻融循环下泡沫微观孔隙结构进行分析, 并使用丢球算法对不同空隙率和孔径泡沫混凝土的微观孔隙进行模拟, 研究微观孔隙结构对弹性模量的影响规律。得出以下结论: 泡沫混凝土内部微观孔隙结构及内部的连接破坏程度随着冻融温度和循环次数的增加而加剧; 慢速冻融时, 其内部破坏多为孔壁破坏, 循环冻融时, 在破坏力积累作用下使其内部连接发生破坏, 并形成贯通裂缝; 泡沫混凝土中气泡占比约为 60%, 多为依附于骨架的细小气泡, 既能减轻泡沫混凝土的重度, 又能保证其强度; 泡沫混凝土的弹性模量会伴随空隙率和孔隙直径的增大而减小。

**关键词:** 泡沫混凝土; 微观孔隙; 孔隙结构特性; 电镜扫描; 弹性模量

随着泡沫混凝土的发展及制备工艺逐渐提高, 泡沫混凝土在工程中的应用愈发普遍。由于泡沫混凝土具有质量轻、较好强度、环保及保温等特点, 不仅可以作为建筑材料及保温材料, 也可很好地应用在路基材料中。外界环境条件、制备材料及制备工艺对泡沫混凝土的特性均具有较大影响, 国内外学者对此进行了大量的研究。Valore 等从泡沫混凝土的制备工艺、材料组分等角度对泡沫混凝土物理特性影响进行了研究; 张磊蕾利用 42.5 级快硬硫铝酸盐水泥和蛋白质发泡剂对不同密度的泡沫混凝土进行制作, 研究其不同密度下的强度特性, 并拟合了密度与强度之间的关系曲线; 欧楚萍等采用 SZ61 体视显微镜对泡沫混凝土样品孔隙进行采集, 并使用 Image-Pro plus 进行分析, 统计分析了孔隙大小、圆度、表面积大小及分维度数对泡沫混凝土强度特性的影响。泡沫混凝土中存在的孔隙特性不仅对泡沫混凝土的重度具有较大影响, 也会对其强度力学特性有所影响。众多学者在宏观上从多角度对泡沫混凝土进行了研究, 然而对泡沫混凝土的微观结构研究方面却很少。该文利用扫描电镜对循环冻融下的标准泡沫混凝土试件进行扫描处理, 并借助 Image 软件对 SEM 图像进行处理分析, 研究泡

沫混凝土的气泡结构特性对其力学性能的影响。除此之外, 还采用丢球算法对泡沫混凝土的微观气泡结构进行模拟, 以此来研究泡沫混凝土微观气孔结构对弹性模量的影响规律。

## 1 泡沫混凝土试验试件制作及冻融循环试验

### 1.1 试件制作

试验以某高速公路为工程依托, 场地浅部厚为 20~30 m、呈松散~稍密状粉土及粉砂层; 中部为厚度 10~20 m 低强度流塑状的淤泥质土; 底部则为较厚的粉砂及粉质砂土, 该层位土层较为稳定。依托工程 MK2+152~MK2+232 主线段采用泡沫混凝土进行路基置换, 以此改善路基的承载能力及各项性能指标。试件的制作, 采用与实际工程相同的试验原材料, 即 42.5 级普通硅酸盐水泥, HT 复合发泡剂, 其泡沫混凝土的设计参数如表 1 所示。试件采用 100 mm×100 mm×100 mm 的标准立方体模具进行制作, 首先对试验模具进行清洁并涂刷脱模剂, 然后将泡沫混凝土浇筑在试验模具中, 浇筑过程中在侧面进行轻轻敲

收稿日期: 2021-07-10(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51708175); 国家科技支撑计划项目(编号: 2015BAB07B06); 浙江省交通运输厅科技计划项目(编号: 2014H24)

作者简介: 蔡军, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 260554563@qq.com

击,以保证试件密实,待试件浇筑完成 30 h 后脱模,并放置在标准恒温养护箱中,养护 28 d。

表 1 1 m³ 泡沫混凝土的配比

设计重 度/(kN · m <sup>-3</sup> )	设计 流动 度/mm	水泥/ kg	水/ kg	泡沫 剂/ L	强度设计 值(28 d)/ MPa
6.0	180	350	210	677.1	>0.8

1.2 冻融循环试验

为研究泡沫混凝土在冻融循环条件下的微观结构特征,将完成 28 d 养护的试验试件放置在循环冻融试验机中进行循环冻融试验。试验共设置 4 个试验组,为保证试验数据的可靠,减少试验偶然误差,每个试验组同时放置 5 个试件进行冻融循环试验,试验共使用 20 个试件,冻融循环方案如表 2 所示。冻融循环方式共分为慢速冻融和 3 次循环冻融两种。慢速冻融是将试件环境温度从 20 ℃ 缓慢降至 0 ℃,再降至-20 ℃,其冻融时间为 8 h;3 次循环冻融是指将试件反复冻融循环至-60、-20 ℃,其冻融时间间隔为 4 h。对完成冻融循环的试件进行切片处理,选取质地均匀的切片进行扫描电镜处理。

表 2 冻融循环试验方案

试验组 1	试验组 2	试验组 3	试验组 4
慢速冻融至 0 ℃	慢速冻融至 -20 ℃	3 次循环至 -20 ℃	3 次循环至 -60 ℃

2 循环冻融下泡沫混凝土微观孔隙特性

2.1 循环冻融下孔隙特征

选取每个冻融循环试验组的试件切片,首先在扫描电镜的低倍模式下观察不同试验组冻融状态下的整体形貌,其次寻找特征区域切换高倍模式进行局部放大观察,并保存扫描电镜下的观察图片。在扫描电镜放大 50 倍下,各冻融循环试验组下的孔隙特征如图 1 所示。由图 1 可知:泡沫混凝土的内部具有较多孔隙存在,随着冻融循环条件的不同,其内部的孔隙结构不尽相同。由图 1(a)可知,在慢速冻融至 0 ℃ 时,泡沫混凝土的内部孔隙为较均匀规则的球形,孔隙间几乎未连接贯通;由图 1(b)可知:在慢速冻融至-20 ℃

时,泡沫混凝土内部的孔隙大小不一,形状呈现不规则状,孔隙间的内部连接出现开裂裂缝;由图 1(c)可知:3 次循环冻融至-20 ℃ 时,泡沫混凝土内部孔隙也呈现大小不一的不规则状,内部孔隙之间的连接缺失较多,连接性较差;由图 1(d)可知:3 次循环冻融至-60 ℃ 时,其内部孔隙形状特征与 3 次循环冻融至-20 ℃ 时基本相同,但其内部孔隙的连接性相对最差,内部孔隙之间的连接不仅缺失较多,而且现存的孔隙内部连接也存在较多的破裂现象。

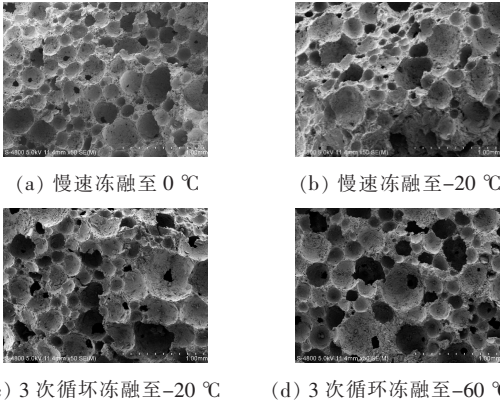


图 1 扫描电镜放大 50 倍下泡沫混凝土试样 SEM 照片

2.2 循环冻融下孔隙孔洞破坏特征

依据泡沫混凝土孔隙孔洞破坏的部位,可划分为孔隙孔洞内部连接破坏和孔隙孔洞内部贯通破坏两种形式。泡沫混凝土材料在温度的变化下会发生物理变形,致使其内部孔隙结构发生变形破坏。当对试件进行慢速冻融时,由于温度的变化致使其内部孔隙结构发生贯通破坏,其破坏主要发生在孔隙的孔壁内部薄弱点,且温度变化较大时孔隙空洞破坏更为明显,如图 2 所示。

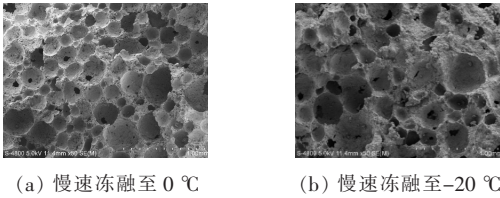


图 2 泡沫混凝土内部孔隙孔洞破坏图

当冻融循环条件为 3 次循环冻融时,由于在温度变化和循环冻融条件的双重作用下,泡沫混凝土内部孔隙结构不仅会在孔壁薄弱处发生破坏,还会在破坏能量累积的作用下继续破坏内部结构。当破坏能量大于泡沫混凝土内部孔隙的连接强度时,会导致孔隙内部的连接发生破裂或破坏,进而大幅降低泡沫混凝土

的强度,如图 3、4 所示。由图 3 可知:当温度变化幅度较大时,泡沫混凝土内部孔隙结构的破坏程度也愈加严重。

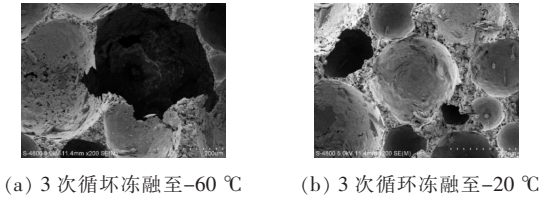


图 3 泡沫混凝土内部孔隙破坏

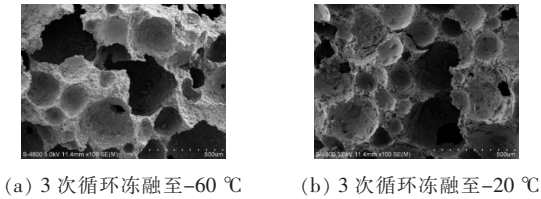


图 4 泡沫混凝土内部孔隙连接处破坏

2.3 循环冻融下孔隙裂缝破坏特征

由图 4 可知:当对试验试件进行 3 次循环冻融试验时,由于温度和循环冻融的作用,泡沫混凝土孔隙内部连接会在破坏力的作用下发生裂缝扩展,其裂缝扩展过程以 3 次循环冻融至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况为例,如图 5 所示。在温度反复变化的作用下,泡沫混凝土材料内部的物理变形反复发生,致使其破坏力积累,在材料较为薄弱的孔隙壁处发生细小裂缝,如图 5(a)所示;当破坏力逐渐积累增大时,微裂缝的两端首先发生张拉破坏应力集中现象,在张拉破坏应力的作用下,微裂缝

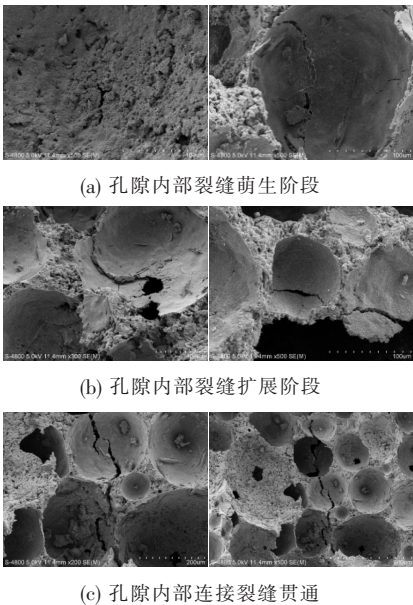


图 5 泡沫混凝土内部孔隙连接裂缝发展过程

会逐渐向两侧扩展,如图 5(b)所示;当破坏力继续积累增大时,裂缝两端的张拉破坏应力也会随之增大,当其大于孔隙内部的连接力时,会导致孔隙内部的连接发生破坏,产生贯通裂缝,如图 5(c)所示。

2.4 基于 Image 软件的泡沫混凝土孔隙特性分析

Image 是一种可对图像进行分析和处理的软件,Imagej 软件可以对 SEM 图像进行二值化处理,提取 SEM 原图中的黑白图和轮廓图。利用该软件可以泡沫混凝土 SEM 图中气泡尺寸、数量、所占比例及形状参数进行定量分析,其处理流程如图 6 所示。

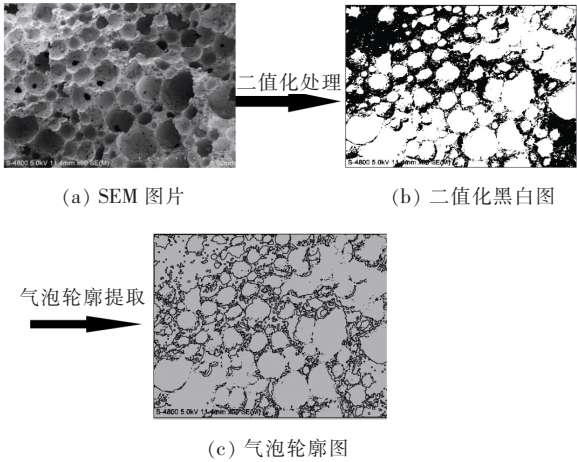


图 6 Image 软件图像处理流程图

使用 Image 软件对各冻融循环条件下的泡沫混凝土 SEM 图进行处理,如图 7 所示。图 7 中白色部分代表泡沫混凝土内部孔隙,黑色代表泡沫混凝土内部结构。由图 7 可知:在慢速冻融条件下的泡沫混凝土内部气孔,相对较 3 次冻融循环条件下的较为均匀。

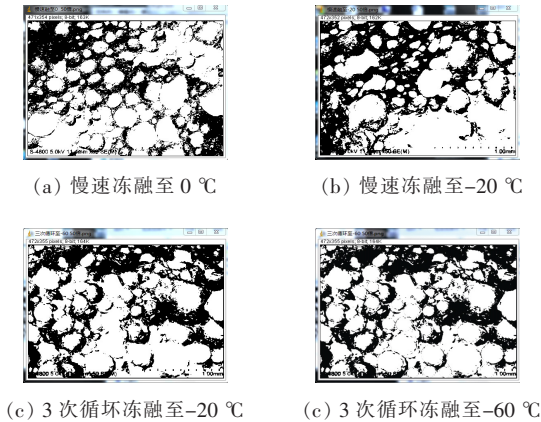


图 7 Image 软件处理 SEM 图

利用 Image 软件对泡沫混凝土 SEM 黑白图中的



黑色和白色面积进行提取,其结果如表 3 所示。由表 3 可知:泡沫混凝土中的气泡占比约为 60%,由于泡沫混凝土在制备过程中受制备工艺和材料的影响,会产生一定的消泡作用,其气泡率有所降低。

由于在泡沫混凝土发泡过程中,气泡大小往往相差较大,为了分析气泡大小及占比,利用 Image 软件对气泡的大小尺寸进行限定,计算出大于每一级尺寸的气泡数量,进而分析气泡的分布规律,如表 4 所示。

表 3 黑白色面积占比数据			
冻融条件	黑色部分 面积/mm <sup>2</sup>	白色部分 面积/mm <sup>2</sup>	气泡率/ %
慢速冻融至 0℃	59 303	10 696	64.33
慢速冻融至-20℃	66 834	99 310	59.77
3 次循环冻融至-20℃	87 627	78 238	47.16
3 次循环冻融至-60℃	67 578	99 982	59.67

表 4 气泡占比统计								
试验组	大于以下面积(mm <sup>2</sup> )的气泡数量/个							
	0	0.017 1	0.034 2	0.068 5	0.136 9	0.273 9	0.547	1.00
试验组 1	799	216	108	67	42	37	30	21
试验组 2	445	220	155	98	72	49	37	22
试验组 3	632	242	149	89	65	55	41	34
试验组 4	424	182	109	72	47	28	21	13

由表 4 可知:泡沫混凝土中存在的气泡多为细小气泡,该气泡的大量存在多依附在泡沫混凝土的内部骨架中,不仅可以减轻泡沫混凝土的自身重量,还使泡沫混凝土具有一定强度。当泡沫混凝土中大气泡存在较多时尽管可以有效减轻其自重,但由于大气泡的存在使泡沫混凝土内部的连接大幅降低,使其强度大幅下降。故在泡沫混凝土制备时,保证其内部孔隙为细小气泡,既可有效控制泡沫混凝土的自重,也可保证其强度。

### 3 泡沫混凝土内部孔隙特性对弹性模量的影响

泡沫混凝土内部孔隙特性,不仅对其重度和强度影响显著,对其弹性模量等力学特性也有较大影响。该文运用模拟试验方法进行研究,并采用丢球算法对

泡沫混凝土的孔隙结构进行模拟,借助三维格构分析法对微观孔隙结构进行拉伸,从而模拟泡沫混凝土的孔隙结构弹性模量。

#### 3.1 泡沫混凝土微观孔隙结构的生成

在模拟试验中,运用丢球算法将尺寸为 250、350、450 μm 气泡分布在边长为 10 mm 的立方体中,分别用来模拟气泡率为 55%、65%、75% 的泡沫混凝土孔隙结构,共可得 9 种泡沫混凝土微观孔隙结构。

#### 3.2 泡沫混凝土弹性模量分析

基于丢球算法模拟生成的泡沫混凝土微观孔隙结构,应用三维格构分析法,将孔隙微观结构离散化为格构单元,并对结构内的水泥基单元赋予相应的杨氏模量、抗拉强度及剪切模量值。之后施加一个轴向拉伸位移,进行格构断裂分析,得出泡沫混凝土微观孔隙结构的拉伸位移与荷载,进而求得该结构下的弹性模量。计算结果如表 5 所示。

表 5 各情况下的泡沫混凝土弹性模量			
微观孔隙模型	拉伸位移/mm	对应荷载/kN	弹性模量/GPa
P55%—B250 μm	0.200 001	4.343 100	2.171 539 142
P55%—B350 μm	0.200 001	4.114 960	2.057 469 713
P55%—B450 μm	0.200 000	2.793 510	1.396 755 000
P65%—B250 μm	0.200 000	2.532 580	1.266 290 000
P65%—B350 μm	0.200 001	1.967 230	0.983 610 082
P65%—B450 μm	0.200 001	1.323 680	0.661 836 691

续表 5

微观孔隙模型	拉伸位移/mm	对应荷载/kN	弹性模量/GPa
P75%—B250 $\mu\text{m}$	0.200 000	1.215 810	0.607 905 000
P75%—B350 $\mu\text{m}$	0.200 000	0.935 845	0.467 922 500
P75%—B450 $\mu\text{m}$	0.199 999	0.539 801	0.269 901 850

注:55%—250  $\mu\text{m}$  指气泡率为 55%,模拟气泡尺寸为 250  $\mu\text{m}$ ;其余同。

依据泡沫混凝土模型模拟的气泡率及气泡尺寸,绘制各种情况下弹性模量统计图,如图 8 所示。

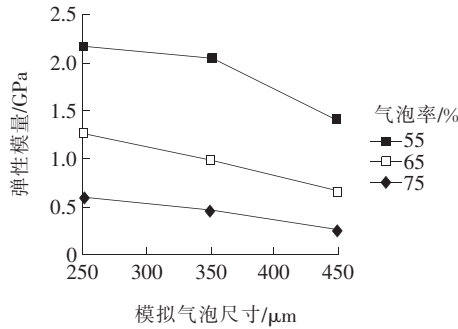


图 8 泡沫混凝土弹性模量统计图

由图 8 可知,当气泡尺寸相同时,泡沫混凝土的弹性模量随着气泡率的增加而减小;当气泡率相同时,泡沫混凝土的弹性模量随着气泡尺寸的增大而减小。

4 结 论

泡沫混凝土的微观孔隙结构与其物理特性紧密相关,该文借助扫描电镜和 Image 软件对冻融循环下的泡沫混凝土微观结构进行分析;并采用丢球算法对泡沫混凝土的微观孔隙结构进行模拟,以此研究泡沫混凝土微观气孔结构对弹性模量的影响规律。得出结论如下:

(1) 随着冻融循环温度变化增大、循环次数增加,泡沫混凝土内部孔隙结构及其内部连接的破坏程度会随之增加;当进行慢速冻融时,其内部孔隙破坏多为孔壁薄弱处的破坏,当进行循环冻融时,在破坏力积累作用下使其内部的连接发生破坏,并形成贯通裂缝,从而使泡沫混凝土强度降低。

(2) 泡沫混凝土中气泡占比约为 60%,内部气泡多为细小气泡且依附于泡沫混凝土的骨架,该气泡的存在可以有效减轻泡沫混凝土的重度,还能保证其具有一定的强度。

(3) 当气泡尺寸相同时,泡沫混凝土的弹性模量随着气泡率的增加而减小;当气泡率相同时,泡沫混凝土的弹性模量随着气泡尺寸的增大而减小。

参考文献:

[1] AMRITHA R, DHANYA S. Physical and Fimctional Characteristics of Foam Concrete: A Review[J]. Consh Build Mater, 2019, 221: 787—799.

[2] 宋安祥,郭远巨,王雪,等. 泡沫混凝土研究新进展与应用现状[J]. 混凝土,2018(9).

[3] MECHTCHERINE V, MARKIN V, WILL F, et al. Pro-duction of Monolithic, Load—Bearing, Beat—Insulatitrg Wall Struchmes by Additive Manufachming with Foam Concrete[J]. Bauingenieur, 2019, 94:405—415.

[4] NUR A J, LIEW Y M, HEAL C Y, et al. Correlation be-tween Pore Structure, Compressive Strength and Thermal Conductivity of Porous Metakaolin Geopolymer[J]. Con-str Build Mater, 2020, 247:118 641.

[5] 宋强,张鹏,鲍玖文,等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J/OL]. 硅酸盐学报, 2021(2). [2021—01—26]. ht-tps://doi.org/10.14062/j. issn. 0454—5648. 20200316.

[6] Vcore R C. Methods of Preparing Iorn Oxide Mortars or Cements with Admixtures and the Resulting Products: U. S. A. US4188231[P]. 1980—02—12.

[7] 张磊蕾. 泡沫混凝土的组成与性能、微结构的研究[D]. 中国建筑材料科学研究总院硕士学位论文, 2011.

[8] 欧楚萍,隋玉武,王冠通,等. 孔隙特征对泡沫混凝土基本性能的影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020(1).

[9] 蒋俊,李军,牛云辉,等. 矿物掺合料对超轻泡沫混凝土气孔结构及性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(6).

[10] 嵇鹰,张军,武艳文,等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018(11).

[11] 李方贤,余其俊,罗云峰,等. 泡沫混凝土气孔结构数学表征及其分析[J]. 西南交通大学学报, 2018(6).

[12] 胡艳丽,郝晋高,赵向敏,等. 泡沫轻质混凝土性能与气孔结构关系研究[J]. 南京理工大学学报, 2019(3).