

文章编号:1007-9629(2023)01-0103-08

## 发泡混凝土孔结构快速检测与精准识别

李 豪<sup>1,2,3</sup>, 王德志<sup>1</sup>, 魏永起<sup>2,3,\*</sup>, 姚 武<sup>2,3</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部  
重点实验室, 上海 201804; 3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

**摘要:**提出了基于零度光源的非接触孔结构检测和识别方法,用零度光源辅助采集孔结构图像信息,并改进了图像降噪的均值滤波算法,研究了孔结构特征识别方法.结果表明:零度光源能大幅增强发泡混凝土孔隙图像的对比衬度,节约样品后处理时间;改进均值滤波法可有效抑制孔隙图像噪声,提升孔隙边缘的清晰度;优选 Canny 算子增加了薄壁孔结构特征识别的精准性.该方法实现了发泡混凝土孔边缘特征、孔径分布和孔隙率等孔结构信息的快速检测与精准识别,有望用于其他发泡材料的孔结构表征.

**关键词:**多孔材料;孔结构;体视学;零度光源

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.015

## Rapid Detection and Accurate Identification of Foamed Concrete Pore Structure

LI Hao<sup>1,2,3</sup>, WANG Dezhi<sup>1</sup>, WEI Yongqi<sup>2,3,\*</sup>, YAO Wu<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil & Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;  
2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University,  
Shanghai 201804, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University,  
Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A non-contact pore structure detection and identification method based on zero-degree light source was proposed. The pore structure image was acquired with the assistance of the zero-degree light source, and the mean filtering algorithm for image denoising was improved. The pore structure feature identification method was studied. The results show that the zero-degree light source can greatly enhance the contrast of the pore image of foamed concrete, thus the post-processing time is saved. The improved mean filtering method can effectively suppress the noise of pore image and improve the clarity of pore edge. The optimized Canny operator increases the accuracy of structural feature identification of thin-walled pores. The rapid detection and accurate identification of pore structure information are realized by this method, such as pore edge characteristics, pore size distribution and porosity of foamed concrete, which is expected to be used for pore structure characterization of other foamed materials.

**Key words:** porous material; pore structure; stereology; zero-degree light source

发泡混凝土是一种通过人工方式引入微米至毫米尺度气孔的多孔材料,因此具有优良的保温、隔热性能.前期研究发现,发泡混凝土中孔结构是影响其

传热性能的重要因素<sup>[1-3]</sup>,但其微米至毫米尺度的孔隙无法使用传统氮吸附法或压汞法进行精确测定<sup>[4]</sup>.因此,研究人员尝试采用光学成像技术表征材料毫

收稿日期:2021-10-18; 修订日期:2021-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968060); 宁夏一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

第一作者:李 豪(1994—),男,河南新乡人,宁夏大学硕士生. E-mail: 12019130713@nxu.edu.cn

通讯作者:魏永起(1981—),男,河南驻马店人,同济大学讲师,博士. E-mail: yq.wei@tongji.edu.cn

米级的气孔<sup>[5]</sup>,但该方法缺少孔结构图像的分析方法.鉴于此,彭军芝等<sup>[6]</sup>使用 Matlab 对发泡混凝土的孔结构图像进行了量化分析,但其图像中孔的边缘与基体对比度较差,很难对孔结构进行精确识别.张雄等<sup>[5]</sup>使用基体着色并填充纳米微粉的后处理方式,提高了孔壁和孔内的对比衬度,但该方法需要较精细的后处理工艺,且检测精确程度易受操作者制样水平的影响<sup>[7]</sup>.因此建立一种既能简化制样流程又可以进一步提高对比衬度,同时还可以通过选择合适图像识别算法对泡沫混凝土孔结构进行检测和识别的方法就显得尤为必要.通过调研发现,在金属机械零件表面划痕检测时引入低角度光源,可明显提高待测表面与划痕间的对比衬度<sup>[8]</sup>,但其缺少光源角度与成像之间关系的分析.这一问题在田洪志<sup>[9]</sup>的研究中得以解决,其深入研究了单侧光源不同角度对检测金属板表面缺陷的影响,确定了单侧光源照明的最佳角度,但对于缺陷复杂的表面检测仍不理想.冯超<sup>[10]</sup>开发了低适光性表面缺陷的检测方法,提出了针对复杂表面缺陷的检测解决方案.

本文借鉴零度光源在金属表面缺陷检测方面的应用,尝试将其拓展至发泡混凝土孔结构检测领域,以解决发泡混凝土孔特征检测和识别过程中繁琐的样品后处理工艺以及由此可能带来的图像失真问题,为发泡材料孔特征的深入研究提供快速且精准的定量表征方法.

## 1 试验

### 1.1 设备

图像采集设备为 Lapsun 的 USB500 工业相机,像素为 500 万,光学尺寸为 1/2.5 彩色;光学镜头选用 Lapsun 品牌 180X-720X 型号;图像采集软件为 S-EYE 软件,获得 2 048 像素 × 1 536 像素的彩色图像;零度光源选用 Lapsun 生产的 RL-146-00W,为满足视域选定内径为 104 mm.同时,采用 IFV-C40DW 同轴光源和 IDR-F60/20DW 的常光源进行对比分析.

零度光源产生的是一种与试件截面夹角极小的光线,当光线越过一侧孔壁时,在另一侧孔壁只有小部分的光线可以到达其孔壁上侧区域,从而形成了一个与孔形貌相同的“黑体”,使采集的图像中孔上壁和孔内壁具有很强的区分度<sup>[11]</sup>,其结构示意图见图 1(图中安装孔公称直径和深度均为 3 mm).同轴光源是通过单向透光玻璃而产生对界面垂直方向成像的特征光源.

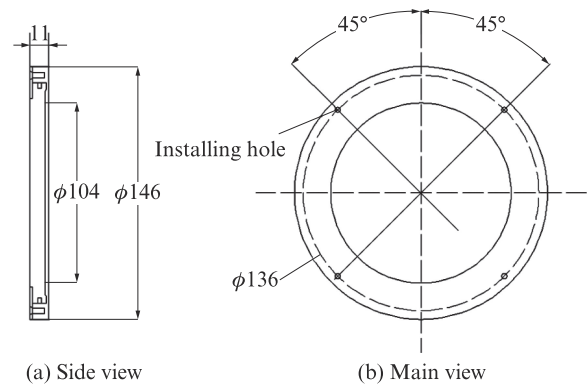


图1 零度光源结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of zero-degree light source(size: mm)

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试件制备

用密度 500 kg/cm<sup>3</sup> 的发泡混凝土,制备 100 mm × 100 mm × 100 mm 的试件,并进行切割、打磨、催粉.具体步骤为:(1)使用锯条将泡沫混凝土切割;(2)将具有待测截面的试件使用 6.5 μm 的极细砂纸进行打磨<sup>[5]</sup>,打磨时控制每 2~3 个相对运动周期清理 1 次砂纸上的粉末,每个试件截面的打磨过程持续 20~30 min;(3)使用压缩空气型喷枪,将打磨完成后试件上的残留粉末催出,该过程中保持待测截面与喷枪喷出的流体相对平行,尽量避免流体对试件的破坏.

### 1.2.2 图像检测

传统图像检测需要对试件进行着色、填粉、再次打磨等后处理,存在对其孔结构的二次破坏问题<sup>[11]</sup>,将未处理的试件分别使用无光源(自然光)、常光源、同轴光源以及零度光源对泡沫混凝土试件的同一截面区域进行采样,不同光源下泡沫混凝土的图像见图 2.由图 2 可见:与无光源(自然光)相比,光源的存在使工业相机能收集到更多光线,有光源的泡沫混凝土孔形貌特征更加显著;同轴光源下的泡沫混凝土孔内与孔壁的对比衬度较小,孔边缘模糊;零度光源下泡沫混凝土孔内与孔壁的对比衬度较大,孔特征更加显著.

## 2 结果与讨论

### 2.1 孔结构视觉图像的最小取样数

发泡混凝土发泡时容易受到环境温度及发泡剂分散程度等变量的影响,成型后孔的特征分布是不均衡的<sup>[6]</sup>,因此需要在孔特征统计之前,确定随机获取图像的最小取样数  $n$ .当取样数足够大时( $n \geq 30$ ),样品均值近似服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的正态分布,因此最小取样数  $n$  实际上是在某置信程度及误差程

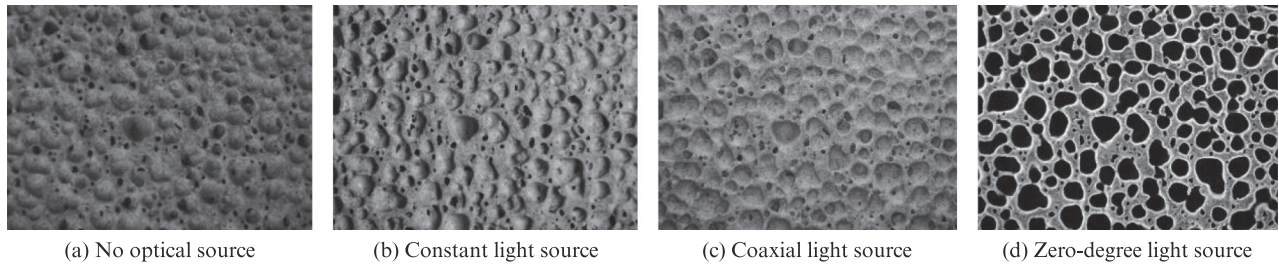


图2 不同光源下泡沫混凝土的图像  
Fig. 2 Images of foamed concrete under different light sources

度下对样品均值的区间估计<sup>[5]</sup>,即:

$$n = \frac{\lambda^2 \sigma^2}{d^2} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为分布参数,其值由置信程度确定,一般情况下混凝土的置信程度为95%,可查得当置信程度为95%, $n=30$ 时, $\lambda$ 为1.96<sup>[12]</sup>;  $d$ 为估计误差,一般取 $d \leq 15\%$ <sup>[5]</sup>.

随机取2组各30张发泡混凝土的图像,用Image-Pro Plus软件进行分析,计算平均孔隙率(体积分数)的最小样本数,结果见表1.由表1可见,2组发泡混凝土的 $n$ 分别为0.1457、0.1599,取整得到 $n=1$ ,即只需1个样本图像即可在保证率为95%的情况下,满足待统计量估计误差小于15%.

表1 最小样本数  
Table 1 Minimum sample amount

Average porosity(by volume)/%	Variance	$n$
44.65	0.000853	0.1457
42.78	0.000937	0.1599

2.2 不同制样方法增强孔结构对比衬度效果对比  
ASTM-C457-06 《Standard test method for

microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete》根据体视学原理,使用线法和网格法对拍摄图像的平均孔隙率进行统计,而后研究人员对制样和拍摄手法进行改进<sup>[13-14]</sup>,设法增加孔内壁与孔壁之间的对比度,使图像中孔的特征更加显著.由文献[6]可知,在试样制备的基础上对其进一步处理,宏观处理发泡混凝土孔结构的传统方法有2种,分别为将孔壁着色和孔壁着色-孔内填充<sup>[5]</sup>.3种处理方法的制样工序流程对比见图3.由图3可见:零度光源法共需要47~65 min;与孔壁着色、孔壁着色-孔内填充相比,零度光源法分别节约了10~15、20~30 min.传统方法若使用扫描电镜(SEM)识别孔隙,在制样工序后还需要进行镀金(30 s)、装样(2 min)、抽真空(3 min)以及对焦扫描(10 min).传统方法在着色阶段要求颜色涂抹均匀以及着色材料不能与孔内壁接触,且填充后剥离白色粉末时,要求刮片不能破坏孔壁,因此其后处理对操作要求较高;而零度光源辅助拍摄的方法,省略了后处理部分,整个流程简便快速.

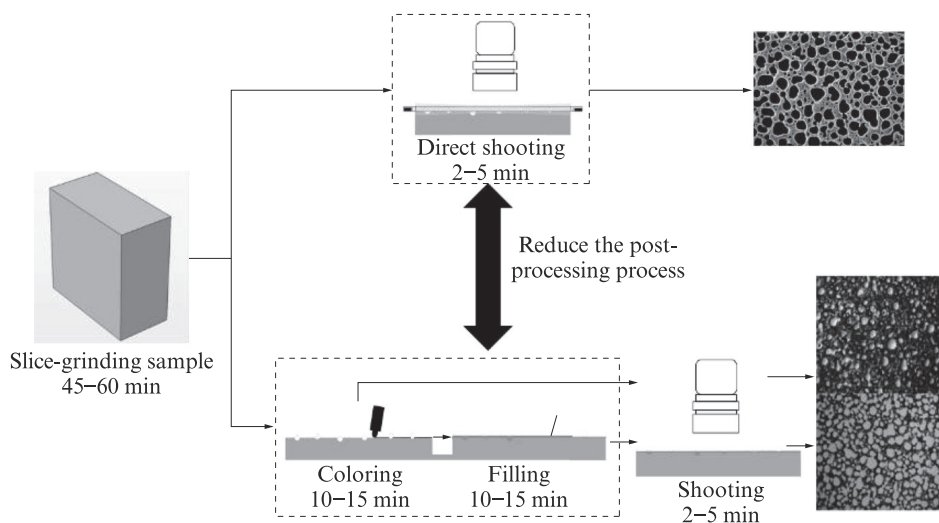


图3 3种处理方法的制样工序流程对比  
Fig. 3 Comparison of sample preparation process of three processing methods

3种处理方法的采样结果见图4。由图4可见：孔壁着色法的位置A(见图4(g))有墨水沁入孔壁，将孔内部分区域着色，导致孔的特征出现偏差；而零度光源法呈现出的孔内部和孔壁区分完整，轮廓清晰；孔壁着色-孔内填充法在位置B、C处(见图4(i))均出现了孔相连通的状况，原因可能是发泡混凝土中孔隙率偏大，相邻孔的孔壁较薄，在使用孔壁着色-孔内填充法刮去粉末的时候，使孔壁遭到了破坏。

### 2.3 孔结构图像优化

在进一步提取图像信息前，一般需要对原始图像进行降噪等优化处理，而判断图像优劣的标准是

图像对目标特征的表达程度<sup>[15]</sup>。发泡混凝土的目标特征是孔的边缘特征以及截面孔的总体特征。首先使用灰度化方法将原始图像变为单通道信息矩阵，其原理是将图像相同位置的不同通道加权平均，得到 $[0-255]$ 的单通道信息<sup>[16]</sup>。采用人眼对红绿蓝颜色的敏感程度进行加权平均<sup>[16]</sup>，得到灰度图像 $g(x, y)$ ：

$$g(x, y) = 0.299 \times \text{Red}(x, y) + 0.587 \times \text{Green}(x, y) + 0.114 \times \text{Blue}(x, y) \quad (2)$$

式中： $\text{Red}(x, y)$ 、 $\text{Green}(x, y)$ 、 $\text{Blue}(x, y)$ 分别为红色、绿色、蓝色通道像素矩阵； $x$ 、 $y$ 分别为矩阵行、列的位置。

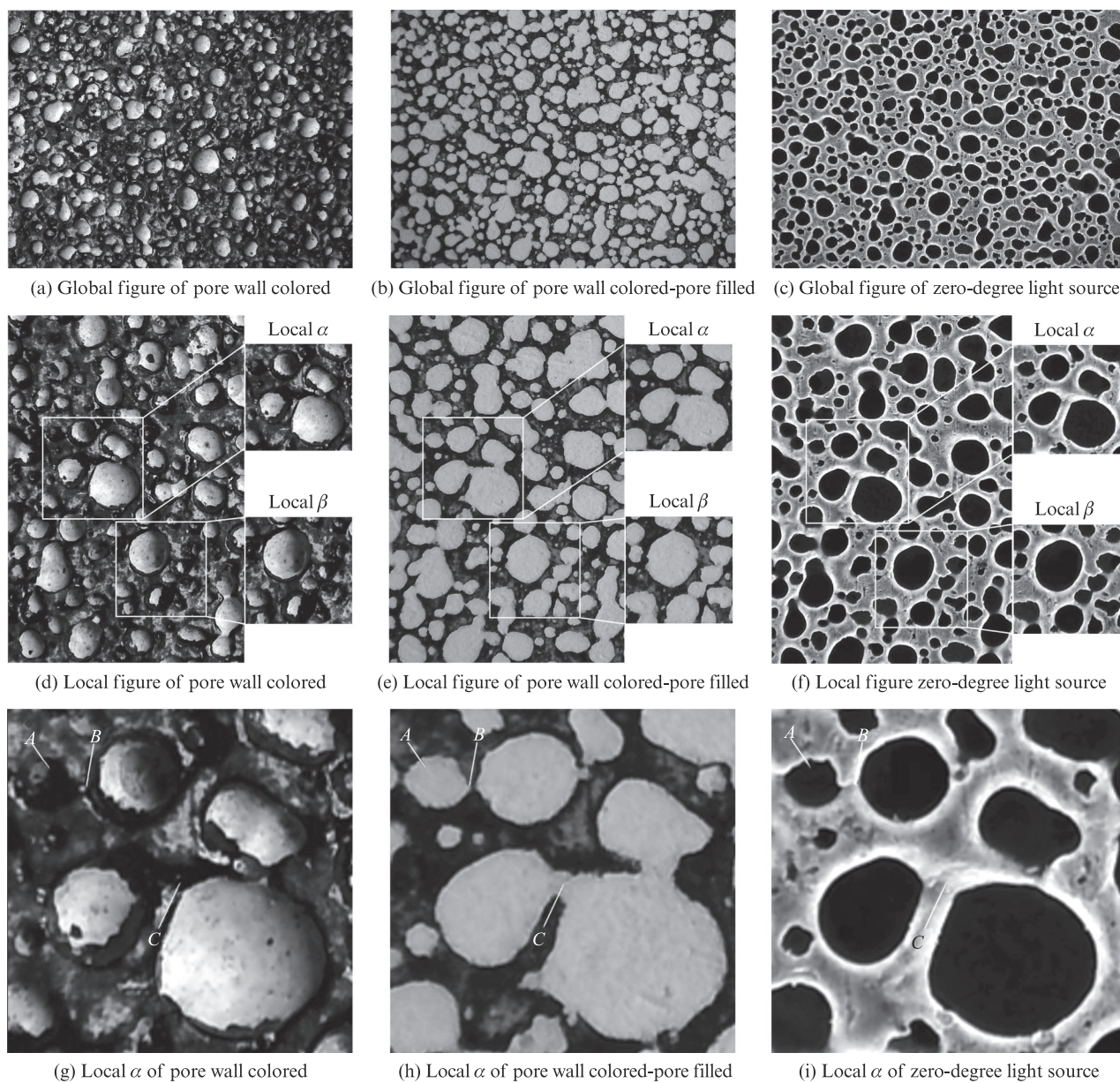


图4 3种处理方法的采样结果  
Fig. 4 Sampling results of three processing methods

3种处理方法得到的发泡混凝土灰度化、降噪处理效果图见图5.由图5可见,灰度化处理后,在孔壁上有一些点状和块状噪点.将大邻域的中值滤波<sup>[17]</sup>得到的图像 $u(x,y)$ 作为噪声,取原图的灰度图像与大邻域中值滤波图像的差值,并将差值小于0的像素替代为0,得到降噪后的图像 $\gamma(x,y)$ :

$$\gamma(x,y)=\max\{u(x,y)-g(x,y),0\} \quad (3)$$

该方法本质上是自动依据图像的整体特征选取全局图像阈值.由图5还可见:孔壁着色法灰度化后在A、B位置有明显的由于着色导致的反光,因此在灰度图中位置A、B处的像素特征与孔内像素特征几乎相同;孔壁着色-孔内填充法在A位置存在无法去除的填充粉末,导致其像素特征与孔内相同;零度光源法经过灰度处理后,孔壁上出现噪声点、块,经过降噪处理后噪声明显减小.

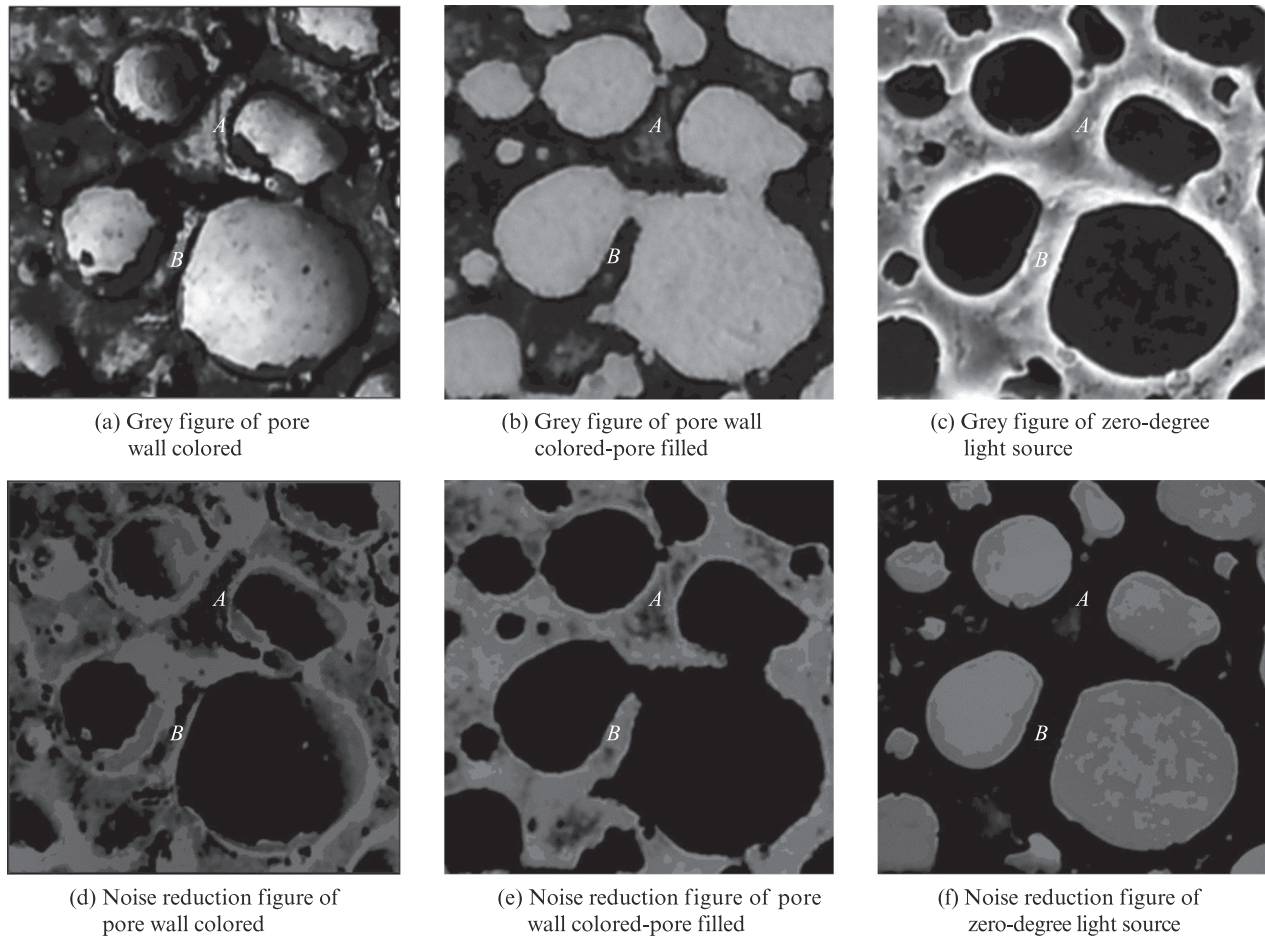


图5 3种处理方法得到的发泡混凝土灰度化、降噪处理效果图  
Fig. 5 Effect figures of gray and noise reduction of foamed concrete by three processing methods

#### 2.4 不同制样方法孔结构特征统计对比

不同的制样方法得到的孔结构图像有明显的差异,本节分别从截面的孔边缘特征、孔径分布、孔隙率等维度进行更深入的探究.分别采用Laplacian、Kirsch及Canny算子<sup>[18]</sup>对孔边缘进行对比分析,结果见图6.由图6可见:Canny算子对孔边缘的提取较好;与Canny算子相比,Laplacian算子和Kirsch算子处理后图像的孔边缘杂乱不清晰,存在更多不连续的“伪边”且孔轮廓模糊;孔壁着色法用Canny算子处理(见图6(g))后,由于着色部分反

光,导致了灰度图像出现“伪孔”及“伪边”;孔壁着色-孔内填充法用Canny算子处理后(见图6(h)),孔壁较薄部分的孔边缘轮廓线相连接,整体成为了1个孔隙;零度光源法用Canny算子处理后图像的孔边缘清晰.

用Image Pro Plus软件计算发泡混凝土的孔径分布和面积率,结果见图7.由图7可见:孔壁着色法共有1536个孔,平均孔隙率为52.73%,半径为0~90 $\mu\text{m}$ 的孔占比81.58%,由于孔壁着色时墨沁入了孔内,从而造成原始图像的边缘不显

著,将单个的孔统计为多个破碎状的小孔(见图6(g)、图7(g));孔壁着色-孔内填充法共有967个孔,平均孔隙率为62.52%,半径为10~90  $\mu\text{m}$ 的孔占比76.42%,与孔壁着色法相比破碎状小孔数目明显下降,但其最大的孔半径是876  $\mu\text{m}$ ,这是因为其大孔来源于多个孔的联通,即相邻的薄壁孔

被统计为1个孔(见图6(h)、图7(h));零度光源法共有677个孔,平均孔隙率为43.86%,其没有出现大量破碎状小孔以及由于薄壁而呈1个联通孔的情况(见图7(i)).综上,零度光源法采集的图像孔隙边缘清晰且薄壁保持完整,可以观察半径为10~900  $\mu\text{m}$ 孔的形貌特征以及统计整体特征.

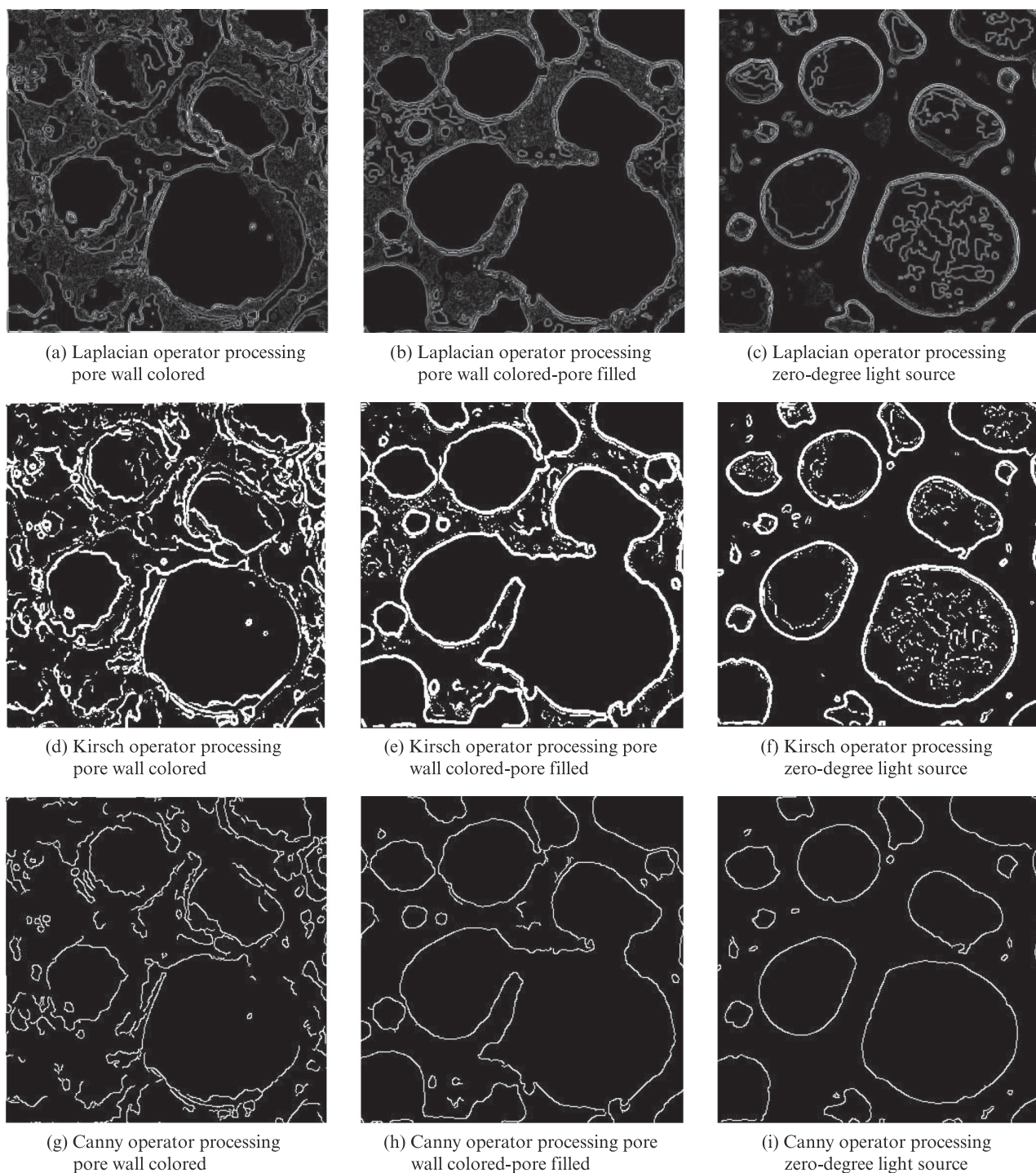


图6 3种处理方法得到的发泡混凝土孔边缘识别对比

Fig. 6 Comparison of pore edge recognition of foamed concrete by three processing methods

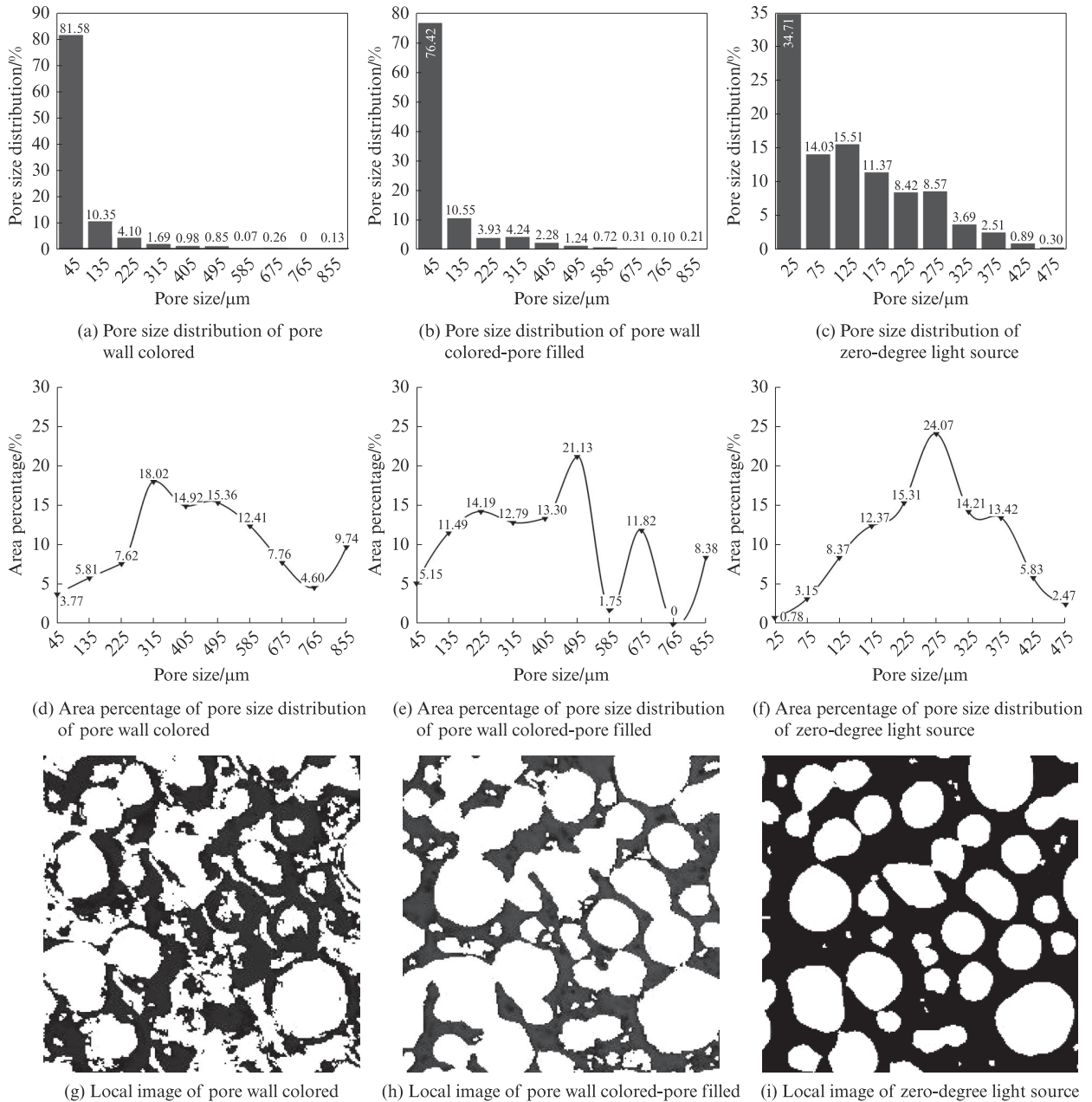


图7 3种处理方法得到的发泡混凝土孔径分布和面积率

Fig. 7 Pore size distribution and area percentage of foamed concrete by three processing methods

### 3 结论

(1)针对发泡混凝土孔测试中的制样问题,选用零度光源法,以非接触式形式增加了孔壁与孔内对比度,与传统方法相比,零度光源法对孔壁的破坏小,孔特征保存完整.

(2)通过统计学方法确定了在固定尺度下发泡混凝土孔结构分析所需的最小样本数,从而增强了零度光源法在统计学意义上的科学性.

(3)优化的均值滤波算法可以将零度光源法获取图像中的噪声去除,并且不影响孔隙图像的细部特征,从而得到相对清晰且完整的孔特征图像.

(4)针对零度光源辅助拍摄的发泡混凝土孔结构图像,使用Canny算法,可以精确地提取发泡混凝土孔边缘图像特征.

#### 参考文献:

[ 1 ] AMRAN M, LEE Y H, VATIN N, et al. Design efficiency, characteristics, and utilization of reinforced foamed concrete: A review[J]. Crystals, 2020, 10:948.

[ 2 ] RAJ A, SATHYANS D, MINI K M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:787-799.

[ 3 ] 赵燕茹, 刘芳芳, 王磊, 等. 基于孔结构的单面冻后混凝土抗

- 压强度模型研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1328-1336.
- ZHAO Yanru, LIU Fangfang, WANG Lei, et al. Modeling of compressive strength of concrete based on pore structure under single-side freeze-thaw condition [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1328-1336. (in Chinese)
- [ 4 ] 余安明, 马坤, 王中平, 等. 低场核磁共振低温测孔技术表征硬化水泥浆体孔结构[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):916-920.
- SHE Anming, MA Kun, WANG Zhongping, et al. Characterization of hardened cement paste pore structure by low field NMR cryoporometry [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):916-920. (in Chinese)
- [ 5 ] 张雄, 黄廷皓, 张永娟, 等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1):177-182.
- ZHANG Xiong, HUANG Tinghao, ZHANG Yongjuan, et al. Image-Pro Plus analysis of pore structure of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1):177-182. (in Chinese)
- [ 6 ] 彭军芝, 彭小芹, 桂苗苗, 等. 蒸压加气混凝土孔结构表征的图像分析方法[J]. 材料导报, 2011, 25(2):125-129.
- PENG Junzhi, PENG Xiaoqin, GUI Miaomiao, et al. Pore structure characterization of autoclaved aerated concrete using image analysis method[J]. Materials Reports, 2011, 25(2):125-129. (in Chinese)
- [ 7 ] ZHAO X H, GOSINE R, DAVIS S, et al. Automated image analysis for applications in reservoir characterization [C]// Proceedings of 4th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies. Piscataway:IEEE, 2000:620-623.
- [ 8 ] 李克斌, 余厚云, 周申江. 基于形态学特征的机械零件表面划痕检测[J]. 光学学报, 2018, 38(8):260-266.
- LI Kebin, YU Houyun, ZHOU Shenjiang. Surface scratch detection of mechanical parts based on morphological features [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8):260-266. (in Chinese)
- [ 9 ] 田洪志. 高速阀板表面缺陷视觉检测技术研究[D]. 烟台:烟台大学, 2021.
- TIAN Hongzhi. Research on high speed visual detection technology of for valve plate surface defects[D]. Yantai:Yantai University, 2021. (in Chinese)
- [10] 冯超. 基于全角度扫描光源的低适光性表面缺陷视觉检测研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- FENG Chao. Research on visual inspection of low light-adaptability surface defects based on omni-angle scanning light source[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2021. (in Chinese)
- [11] WEI Y Q, WEI Z H, XUE K X, et al. Automated detection and segmentation of concrete air voids using zero-angle light source and deep learning[J]. Automation in Construction, 2021, 130:103877.
- [12] 邵淑彩, 孙毓玉, 何娟娟. 应用数理统计:第2版[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2006:318-320.
- TAI Shucui, SUN Yunyu, HE Juanjuan. Applied mathematical statistics [M]. 2nd ed. Wuhan:Wuhan University Press, 2006:318-320. (in Chinese)
- [13] PLEAU R, PIGEON M, LAURENCOT J. Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(2/3):237-246.
- [14] SONG Y, ZOU R, CASTANEDA D I, et al. Advances in measuring air-void parameters in hardened concrete using a flatbed scanner[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 45(5):1713-1725.
- [15] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1):219-226.
- JIANG Gangyi, HUANG Dajiang, WANG Xu, et al. Overview on image quality assessment methods[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(1):219-226. (in Chinese)
- [16] 曾俊. 图像边缘检测技术及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- ZENG Jun. Research on image edge detection and its application [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [17] SHAO L, YAN R M, LI X L, et al. From heuristic optimization to dictionary learning: A review and comprehensive comparison of image denoising algorithms[J]. IEEE Transaction Cybernetics, 2014, 44(7):1001-1013.
- [18] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005(3):415-419.
- DUAN Ruiling, LI Qingxiang, LI Yuhe. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005(3):415-419. (in Chinese)