

3D 打印混凝土墙体构件空腔形态设计及热工性能模拟研究

王 猛^a, 石新羽^{a,*}, 崔维久^b, 沈 亮^b, 褚 壮^a

(青岛理工大学 a. 建筑与城乡规划学院; b. 土木工程学院, 青岛 266033)

摘要: 3D 打印混凝土(3DPC)技术不仅实现了快速高效的建筑构件制造, 还能通过优化设计提高建筑墙体的热工性能。3DPC 使用层叠打印工艺, 墙体内部会产生空腔, 但 3DPC 墙体的空腔形态通常设计为简单几何形状, 缺乏对空腔形态与墙体热工性能之间关系的考虑。采用泰森多边形算法、L-system 算法设计墙体构件的空腔形态, 并进行热工性能模拟, 研究了壁厚、空腔体积比、空腔密度分布、空腔体积极差、空腔排布等因素对热工性能的作用规律。结果表明, 不同的空腔形态会影响墙体构件的热工性能, 随着空腔体积比的增大, 墙体构件的导热系数逐渐变小; 空腔密度越大, 导热系数越大; 空腔体积的极差越小, 构件导热系数越大; 空腔排布方式为由密到疏的构件导热系数比由疏到密的构件更小。

关键词: 3D 打印混凝土(3DPC); 算法生成设计; 墙体空腔形态; 墙体热工性能

中图分类号: TU111.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)01-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.001

Research on the cavity shape design and the thermal performance simulation of 3D printed concrete wall components

WANG Meng^a, SHI Xinyu^{a,*}, CUI Weijiu^b, SHEN Liang^b, ZHUO Zhuang^a

(a. College of Architecture and Urban Planning; b. School of Civil Engineering,

Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: 3D printed concrete (3DPC) technology allows fast and efficient production of building components, and also enhances the thermal performance of building walls through optimized design. The 3DPC uses a method of printing that involves stacking layers, resulting in the formation of cavities within the wall. Nevertheless, the cavity within 3DPC walls is commonly designed as a basic geometric shape, without taking into consideration the correlation between cavity shape and the thermal performance of the wall. Algorithms such as Voronoi and L-system were used to design the cavity shape of wall components and thermal performance simulations were carried out to examine the impact of factors such as wall thickness, cavity volume ratio, cavity density distribution, cavity volume range and cavity layout on their thermal performance. The results show that the thermal performance of wall components can be influenced by various cavity shapes. As the cavity volume ratio increases, the

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(52008224)

作者简介: 王 猛(1995—), 男, 山东莱州人。硕士, 研究方向为数字化建筑设计、机械臂建造。E-mail: 594233787@qq.com。

* 通信作者: 石新羽(1983—), 男, 山东泰安人。博士, 副教授, 主要从事数字化建筑设计、智能建造、建筑机器人等方面的研究。
E-mail: sxy@qut.edu.cn。

thermal conductivity of wall components gradually decreases; as the cavity density increases, the thermal conductivity also increases; as the cavity volume range decreases, the thermal conductivity of the components increases. The thermal conductivity of the components whose cavity layout transits from dense to sparse is smaller than that of the components whose cavity layout transits from sparse to dense.

Key words: 3D printed concrete(3DPC); design of algorithm generation; cavity shape; thermal performance of walls

因3D打印具有精度高、材料适用范围广、允许自由规划和可以设计复杂结构等优势,越来越受到建筑领域的关注。3D打印建筑拥有较快的成型速度,极大地缩短了工期,简化了传统现浇施工的养护过程,在一定程度上保证了建筑质量^[1]。

3D打印混凝土(3DPC)技术是以3D打印技术的层叠打印工艺为基础发展的混凝土施工新技术,所使用的混凝土材料需满足跳桌扩展度为160~180 mm、动态屈服应力为(310±30) Pa等条件^[2]。其工作原理是将配置好的混凝土材料通过挤出装置,在计算机软件的控制下按照预先设计好的路径进行打印,最终得到设计的构件^[3]。3DPC具有快速成型、造型多样、节省工期等优点^[4]。

3DPC技术在打印过程中墙体内部会产生空腔。空腔使构件在满足结构强度的同时,能尽可能地减少打印材料的使用^[5]。目前,3DPC墙体空腔形态为简单的几何形状,WANG等使用3DPC技术打印了一些具有不同空腔形态的墙板,如晶格状、三角形、“之”字形和细胞状,并测试了它们的结构性能^[6]。但这些空腔形态过于规则化,并没有对内部空腔进行单独设计,只是对其结构性能进行了测试,缺乏对空腔形态与建筑墙体热工性能之间相互关系的考虑^[7]。DUBOR等将L-system算法应用于空腔形态设计,旨在通过控制3D打印结构中的导热系数,延长热量通过墙体的时间,从而改善热工性能^[8]。传统建筑构件的制造方法通常受限于模具的制作和加工,难以建造具有复杂几何结构的建筑构件,而通过算法生形,可以设计复杂的几何形状^[9],结合3D打印技术,满足复杂建筑构件的制造要求^[10]。ZHANG等开发了一种基于重心支撑的算法(LBTS),该算法的效率更高,并且能够基于网格结构优化构件悬垂区域,生成支撑结构,减少材料用量^[11]。

本文旨在探究3DPC墙体构件空腔形态与热工性能之间的相互作用规律。采用泰森多边形算法和L-system算法对3DPC墙体构件空腔形态进行设计,并运用Ansys软件模拟其传热过程,分别分析了壁厚、空腔体积比、空腔密度分布、空腔体积极差、空腔排布等因素对算法生形的3DPC墙体构件热工性能的影响。

1 研究方法

1.1 算法生形的墙体构件空腔形态

本文依托Rhino软件的Grasshopper组件设计生成墙体构件,使用了泰森多边形和L-system 2种算法,生成构件的原理如图1所示。

由图1(a)可知,泰森多边形算法是一种计算离散点集的算法,在建筑领域的典型应用是水立方的表皮设计。其基本原理是在平面空间内随机生成若干离散点,将相邻的离散点进行连线,得到大量三角形,绘制出每个三角形各边的中垂线,将3条中垂线的交点作为其外接圆的圆心,将相邻三角形的外接圆圆心进行连线,得到的多边形就是泰森多边形^[12-13]。由图1(b)可知,L-system算法是一种描述细胞生长发展中交互作用的数学模型,在建筑桁架设计上应用较多。其基本原理是在设定好的公理、迭代方式、角度、步长等规则下,通过迭代重写规则,将初始的公理逐步扩展成包含大量绘图指令的长字符串,再由绘图器读取长字符串,根据设定的符号含义,形成可视化的几何图形^[14-15]。

采用上述2种算法设计不同的几何图形,并将其应用于3DPC墙体构件的内部空腔设计中,以获得不同的3DPC墙体构件。3DPC墙体构件与传统混凝土砌块相比,在工艺、热工性能表现上存在差异,如图2所示。混凝土空心砌块由浇筑工艺生产,使用水泥砂浆作为黏结材料,砌筑建造完整墙体;3DPC墙体采用

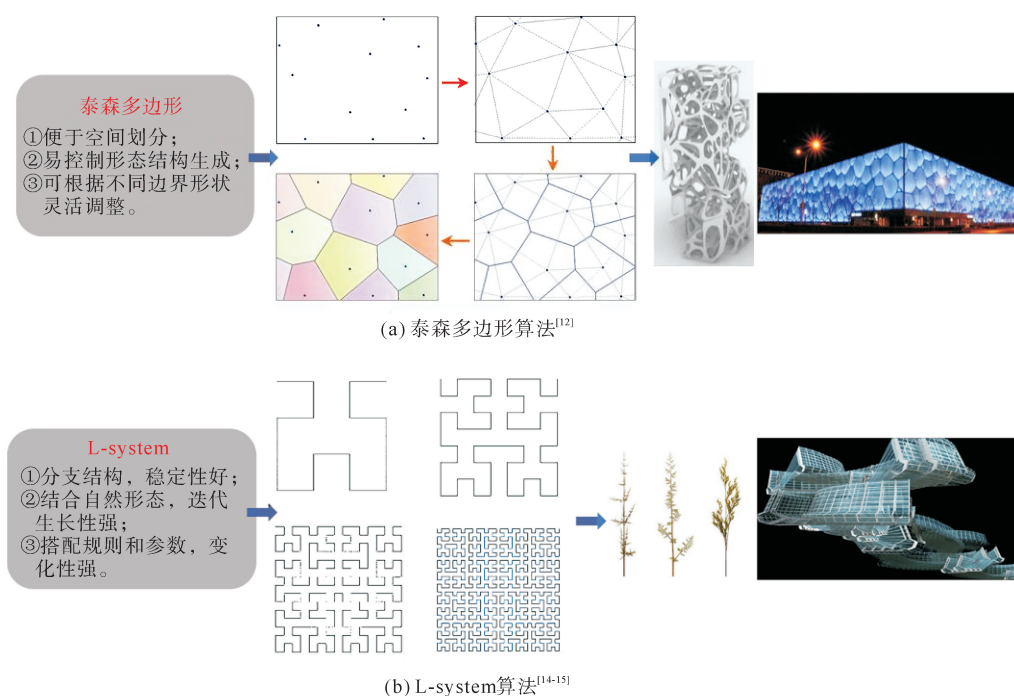


图 1 本文所用算法原理示意及应用

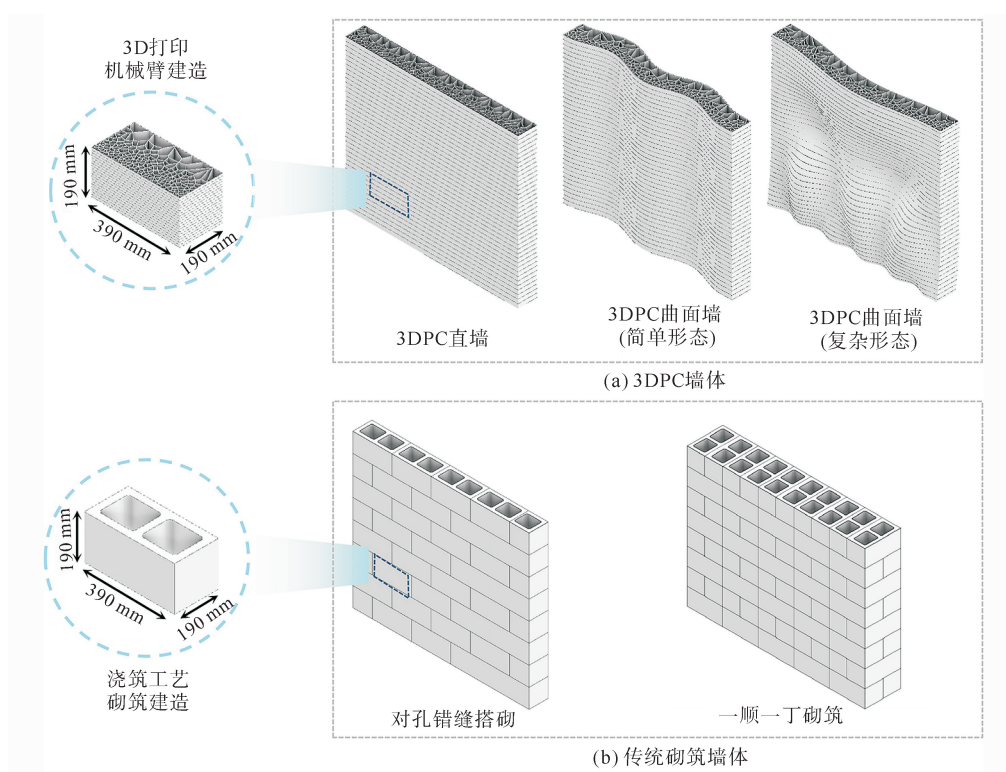


图 2 3DPC 墙体与混凝土墙体基本构件及建造方式的对比示意

机械臂建造的技术手段,能够实现传统直墙及曲面造型墙的一体化建造。通过层叠打印建造的 3DPC 墙体各个部分结构相似、性能相同,但由于其建造尺寸会受到机械臂工作范围的影响,现有技术条件实现大尺度墙体的建造还存在一定难度,所以根据《普通混凝土小型砌块》(GB/T 8239—2014)中关于尺寸的标准要求,选用 390 mm×190 mm×190 mm 的空心砌块作为 3DPC 墙体构件空腔形态设计的基本单元。

与混凝土空心砌块砌筑墙体相比,3DPC技术能够实现整体墙体的建造,不使用黏结材料,减少热传导过程中由黏结材料带来的热缺陷,进而提升其热工性能。

1.2 热工性能有限元模拟及对比分析

3DPC墙体构件内外两侧的传热涉及传导、对流、辐射3个过程,但是,考虑到构件内部封闭的空腔和相对较低的表面温度,传导在传热过程中占主导地位。本研究使用有限元分析软件Ansys中的稳态热分析模块,对不同空腔形态的3DPC墙体构件模型的热工性能进行模拟。研究中涉及混凝土和空气2种传热材料,导热系数分别为1.5和0.026 W/(m·K)。

建筑材料的导热系数是通过使用防护热板(GHP)技术来测量的^[16]。在测试样品相对的2个面上施加温度梯度,而其余面是绝缘的。通过测量从高温面流向低温面的热通量,得到测试样品的导热系数:

$$\lambda = q \frac{L}{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}} \quad (1)$$

式中: λ 和 L 分别为施加温度梯度时样品沿同一方向的导热系数和厚度; T_{hot} 和 T_{cold} 分别为样品的热面温度和冷面温度; q 为由热面向冷面传导的热通量。

研究中热工性能有限元模拟的边界条件参照热防护板方法设定,其中热面温度 $T_{\text{hot}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷面温度 $T_{\text{cold}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,由有限元软件Ansys模拟计算获得热通量 q ,通过式(1)计算出构件的导热系数^[17]。

为方便对比设计的3DPC墙体构件与混凝土空心砌块的热工性能,根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)中规定的平均热阻计算方法,计算出图2所示的单排双孔空心砌块的平均热阻为0.220 (m²·K)/W,导热系数为0.864 W/(m·K)。

2 泰森多边形算法生形的墙体构件空腔形态设计及热工性能模拟

2.1 空腔形态设计

本研究将390 mm×190 mm的矩形划分为若干区域,通过函数控制每个区域内点的数量,实现泰森多边形基础点呈现渐变的变化形式,具体做法为:①将390 mm×190 mm的基础矩形区域沿短边均匀地划分为10个区域,每个区域为390 mm×19 mm的矩形。②使用一次函数 $y = x + 1$ 、二次函数 $y = \pm x^2 + 1$ 分别控制每个区域内点的数量,得到具有递增($y = x + 1$)、内疏($y = x^2 + 1$)、内密($y = -x^2 + 1$)3种基础点分布特点的矩形区域。

使用Rhino软件Grasshopper组件中的Voronoi工具生成泰森多边形图形,得到V-递增、V-内疏、V-内密3种不同泰森多边形基础图形。采用将泰森多边形各边向内偏移后放样成面的方法,实现泰森多边形由边成面的过程,但是在部分基础点排布密集的区域,泰森多边形图形存在个别边太短导致偏移失败无法成面的问题。本文采用合并短边顶点的方法,达到消除短边影响的效果,具体做法如下:①对泰森多边形各个边的顶点编号并按照编号逆时针调整顶点顺序。②计算各个顶点与边界的距离,筛选出与边界距离小于6 mm的点,将这些点直径吸附到区域边界上。③以390 mm×190 mm矩形边界的4个端点为圆心,6 mm为半径画圆,将圆形区域内的泰森多边形顶点用同样的方法吸附到相近矩形边界的端点。④计算每个泰森多边形各边的长度,求得边长小于6 mm的边,拾取这些边的顶点,将这些点两两一组吸附到原边线的中点。⑤按照逆时针顺序对获得的所有点重新分组编号,按照编号顺序将点连接成线,获得成功消除短边的平面模型。

对得到的平面模型赋予不同的壁厚(2、4、6 mm),获得V-递增、V-内疏、V-内密3种类型与2、4、6 mm 3种壁厚的9种泰森多边形基础平面模型。然后将这些基础平面模型在Z方向上赋予190 mm的高度,得到9种基于泰森多边形算法生形的墙体构件模型,如图3所示。

2.2 热工性能有限元模拟及结果分析

将1.2章节中描述的边界条件应用于图3的墙体构件模型,根据Ansys软件计算的热通量 q ,根据式(1)计算3DPC墙体构件的导热系数。

1) 壁厚与空腔体积比分析。如图4(a)所示,基于泰森多边形算法生形的墙体构件中,同种类型的构件随着壁厚的增大,材料用量增多,空腔体积比减小。如图4(b)所示,同种类型的构件随着空腔体积比减

小,导热系数呈现上升的趋势。同时,每种类型中 2 mm 壁厚模型的导热系数最小,与标准混凝土空心砌块的导热系数相比,V-递增类型降低了 53.6%,V-内疏类型降低了 51.1%,V-内密类型降低了 46.7%。

2) 空腔密度分布分析。图 5(a)展示了泰森多边形算法生形模型中 V-递增类型(壁厚 2 mm)的空腔密度分布情况,其导热系数为 0.401 W/(m·K),共有 214 个空腔,空腔密度分布为沿短边递增的形式,体积小于 $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 的空腔占比最多,为 76.6%。图 5(b)展示了泰森多边形算法生形模型中 V-内疏类型(壁厚 2 mm)的空腔密度分布情况,其导热系数为 0.423 W/(m·K),共有 206 个空腔,空腔密度分布为中间疏两侧密的形式,体积小于 $0.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 的空腔占比最多,为 55.8%。图 5(c)展示了泰森多边形算法生形模型中 V-内密类型(壁厚 2 mm)的空腔密度分布情况,其导热系数为 0.461 W/(m·K),共有 264 个空腔,空腔密度分布为中间密两侧疏的形式,体积小于 $0.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 的空腔占比最多,为 70.8%。

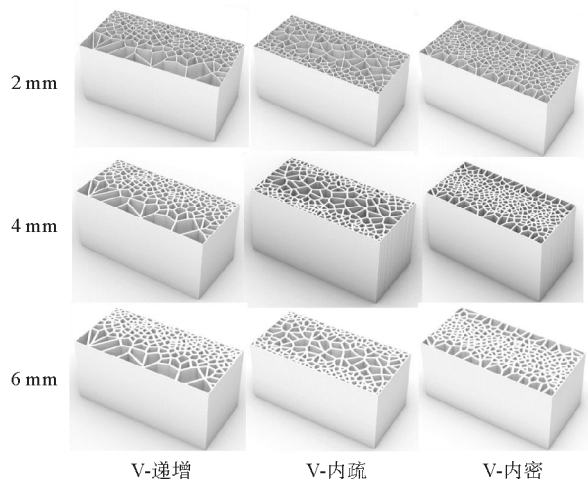


图 3 基于泰森多边形算法生形的墙体构件模型

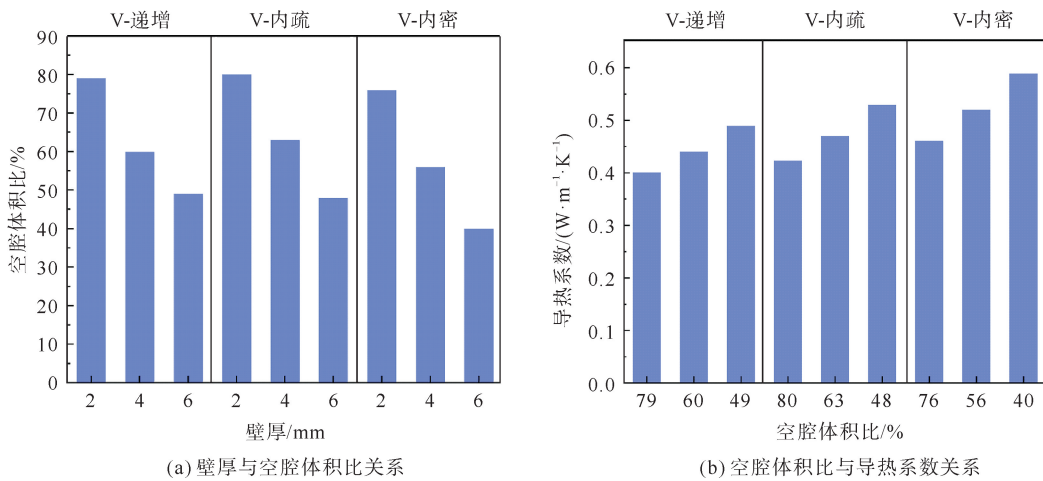
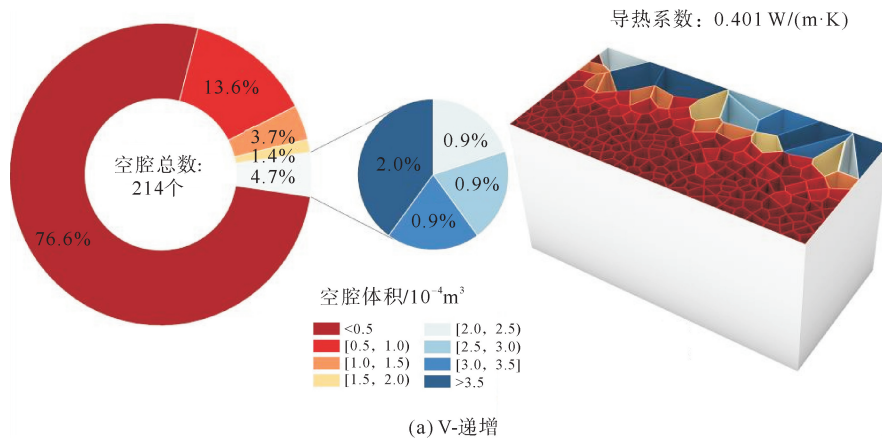


图 4 泰森多边形算法生形的墙体构件壁厚、空腔体积比与导热系数的关系



(a) V-递增

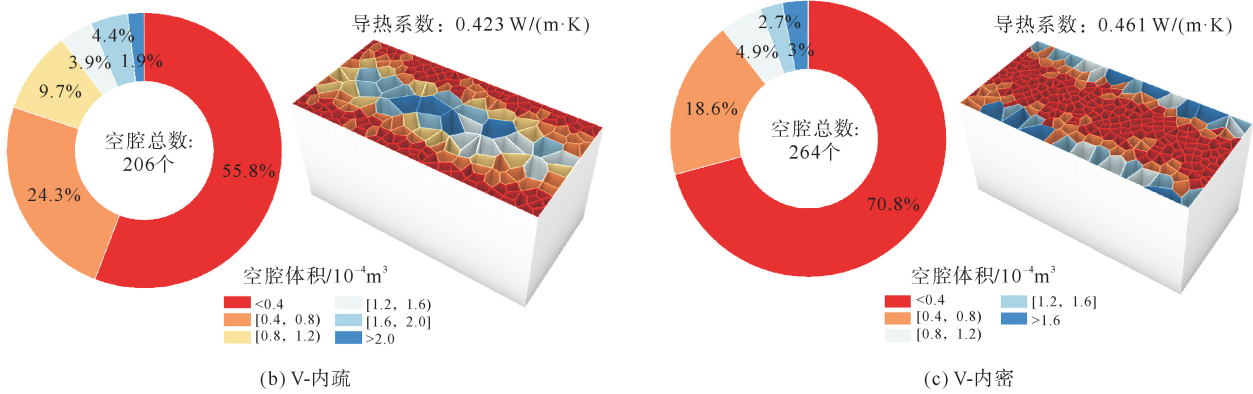


图 5 泰森多边形算法生成的墙体构件空腔密度分布(壁厚 2 mm)

3) 空腔体积极差分析。如表 1 所示,泰森多边形算法生成的墙体构件空腔体积极差减小后,其导热系数呈现增加趋势,其中,V-递增类型的空腔体积极差最大,为 $5.43 \times 10^{-4} \text{m}^3$,并且其导热系数最小,为 $0.401 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

4) 空腔排布分析。图 6 为基于泰森多边形算法生成的 2 mm 模型及其热量分布情况。模型中空腔排布方式由密到疏时(图 6(a)),空腔排布呈现递减的趋势;空腔排布方式由疏到密时(图 6(b)),空腔排布呈现递增的趋势。热工性能模拟结果如表 2 所示,可以看出空腔排布递减的导热系数更小,即热量先经过排布更加密集的体积较小的空腔,后经过排布较疏且体积较大的空腔时,导热系数更小。

表 1 泰森多边形算法生成的墙体构件空腔体积极差与导热系数(壁厚 2 mm)

类型	空腔体积极差/ 10^{-4}m^3	导热系数 $\lambda /$ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
V-递增	5.43	0.401
V-内疏	2.40	0.423
V-内密	1.88	0.461

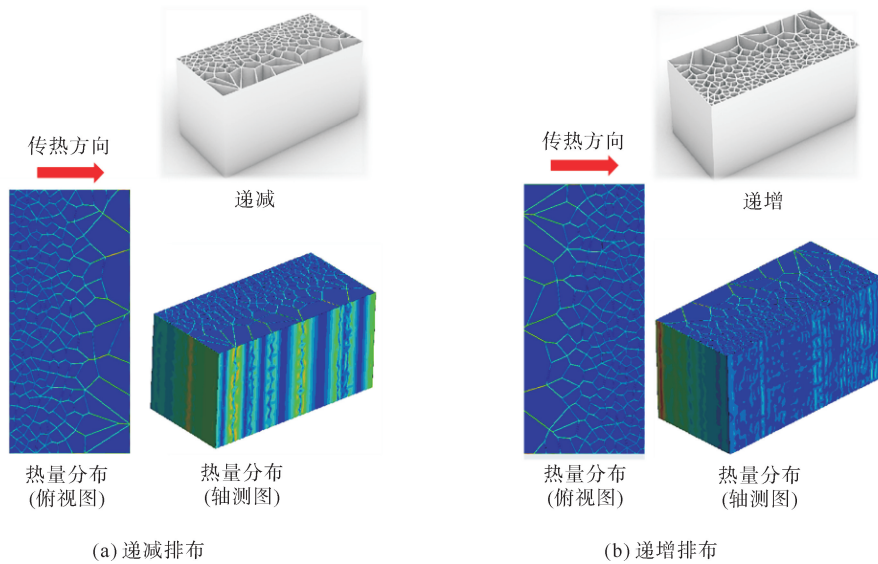


图 6 泰森多边形算法生成的模型空腔排布传热模拟(壁厚 2 mm)

表 2 泰森多边形算法生成的空腔递增与递减排布模型的导热系数

壁厚/mm	排布方式	热通量 $q / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
2	递减	52.744	0.365
	递增	54.047	0.393

3 L-system 算法生形的墙体构件空腔形态设计及热工性能模拟

3.1 空腔形态设计

本文依托 Rhino 软件 Grasshopper 组件中的 Rabbit 插件生成 L-system 图形,采用了 Hilbert curve、Tiles 和 Sierpinski triangle 3 种类型,其产生式语言规则如表 3 所示。

表 3 L-system 算法类型的产生式语言规则

类型	公理	规则	角度/(°)
A; Hilbert curve	X	$X = -YF + XFX + FY-$; $Y = +XF - YFY - FX+$	90
B; Tiles	$X + X + X + X$	$X = F$ $F = FF + F - F + F + FF$	90
C; Sierpinski triangle	$X - Y - Y$	$X = F - Y + F + Y - F$; $Y = FF$	120

注: X 、 Y 为变量; F 为起始点向前移动一定距离 L (步长)并画一条线;“+”代表前进方向右转;“-”代表前进方向左转^[18]。

将 3 种语言规则输入 Rabbit 插件,经过运算可以得到基础的 L-system 图形,根据图形排布基本样式,调整移动距离 L 以满足生成的图形能够符合研究所需要的构件尺寸;通过调整其算法的迭代次数,如 L-system 算法类型 A 迭代 3 次和迭代 4 次,可以得到不同种类更加复杂的 L-system 算法图形。通过算法得到的图形是以线的形式呈现的,接下来对图形线进行偏移处理,获得基础面。根据图形特点可以将其分为两类:①能够一笔画出整个图形,且没有重复路径的,如类型 A 偏移时直接将曲线偏移即可,但需要在曲线开头和结尾处给予一定量的长度补偿。②能够一笔画出整个图形,但有重复路径或者路径之间有交叉的,如类型 B 和类型 C,偏移时要以每个封闭形状为单位,向内偏移。对每种类型的图形分别偏移 2、4、6 mm 之后,再赋予其高度 190 mm,即可得到 L-system 算法生形的墙体构件模型,分别为类型 A 迭代 3 次(L-A-3),类型 A 迭代 4 次(L-A-4),类型 B 迭代 2 次(L-B-2),类型 B 迭代 3 次(L-B-3),类型 C 迭代 1 次(L-C-1),类型 C 迭代 2 次(L-C-2),共计 18 个 3DPC 墙体构件模型(图 7)。

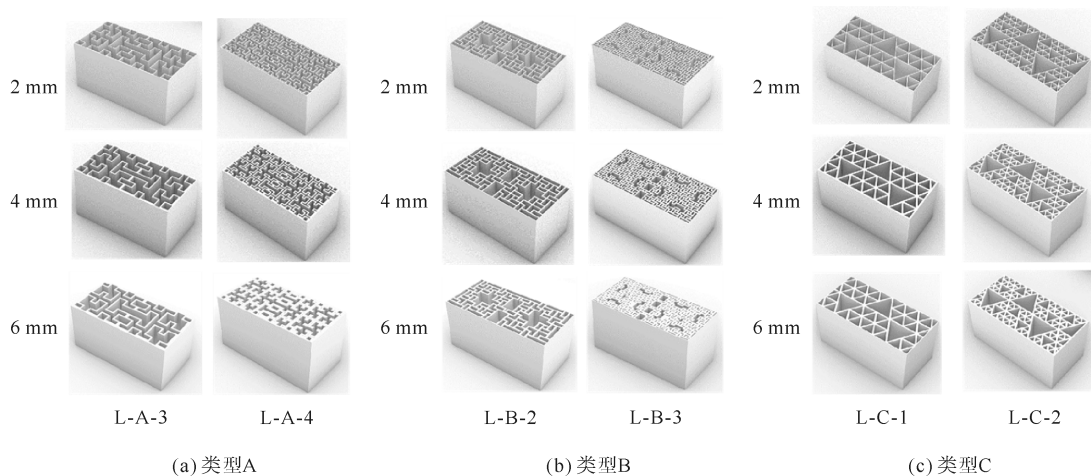


图 7 L-system 算法生形的墙体构件模型

3.2 热工性能的有限元模拟及结果分析

将章节 1.2 中描述的材料导热系数和边界条件应用于图 7 的墙体构件模型,根据 Ansys 软件计算的热通量 q ,根据式(1)计算 3DPC 墙体构件的导热系数。

1) 壁厚与空腔体积比分析。如图 8(a)所示,L-system 算法生形的模型中,同类型模型的壁厚与空腔

体积比的关系也遵循随着壁厚的增加,空腔体积比减小的规律。同时,从图8(b)可以看出,随着空腔体积比的减小,导热系数增加。其中,每种模型中壁厚为2 mm的导热系数最小,与标准混凝土空心砌块相比,L-A-3减少了62.1%,L-A-4减少了50.1%,L-B-2减少了76.2%,L-B-3减少了74.2%,L-C-1减少了56.7%,L-C-2减少了53.7%。

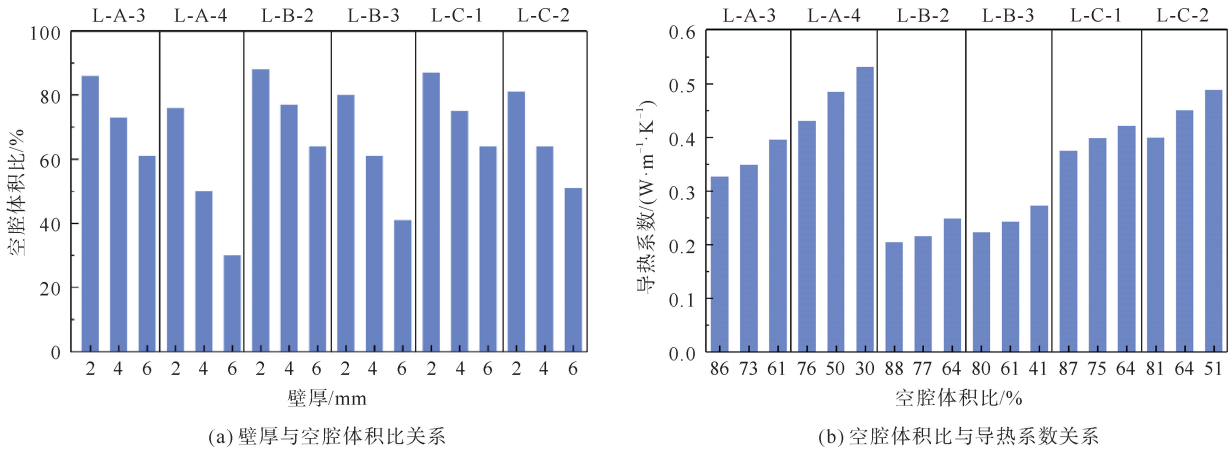
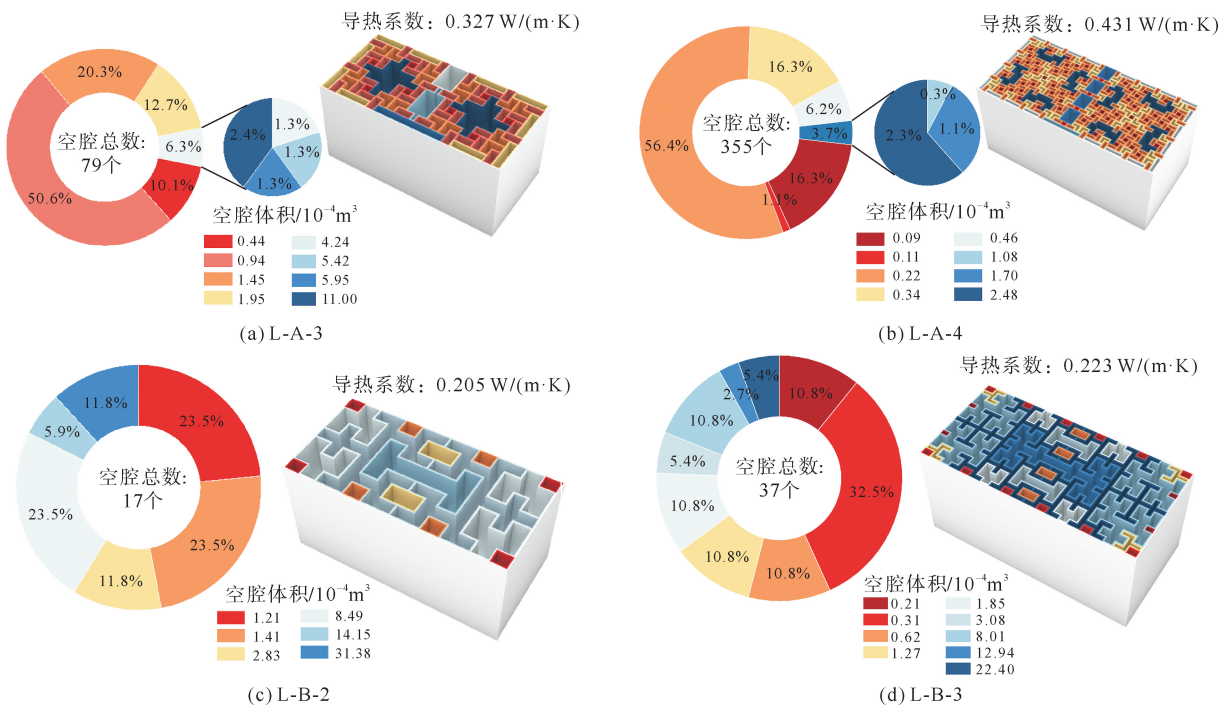


图8 L-system算法生形的墙体构件壁厚、空腔体积比与导热系数的关系

2) 空腔密度分布分析。图9展示了L-system算法生形2 mm壁厚墙体构件的空腔密度分布情况。L-A-3导热系数为 $0.327 W/(m \cdot K)$,共有79个空腔,其中体积为 $0.94 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,为50.6%;L-A-4导热系数为 $0.431 W/(m \cdot K)$,共有355个空腔,其中体积为 $0.22 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,为56.3%;L-B-2导热系数为 $0.205 W/(m \cdot K)$,共有17个空腔,其中体积为 1.21×10^{-4} 、 1.41×10^{-4} 和 $8.49 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,均为23.5%;L-B-3导热系数为 $0.223 W/(m \cdot K)$,共有37个空腔,其中体积为 $0.31 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,为32.4%;L-C-1导热系数为 $0.375 W/(m \cdot K)$,共有51个空腔,其中体积为 $2.18 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,为78.4%;L-C-2导热系数为 $0.400 W/(m \cdot K)$,共有145个空腔,其中体积为 $0.48 \times 10^{-4} m^3$ 的空腔占比最多,为89.0%。



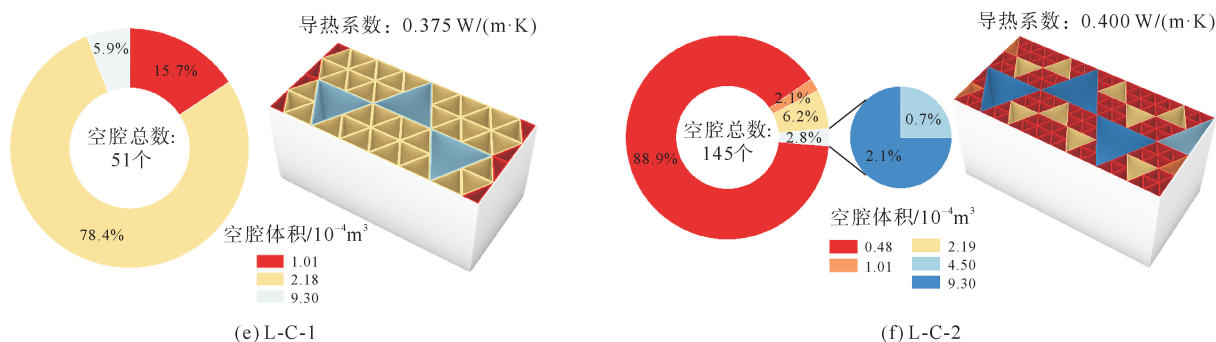


图 9 L-system 算法生形的墙体构件空腔密度分布(壁厚 2 mm)

总体来看,拥有数量多而体积小的空腔的墙体构件导热系数大于拥有数量少而体积大的空腔的墙体构件,例如 L-B-2 与 L-B-3 相比,L-B-2 的模型空腔数量少,每个空腔体积相对较大,导热系数较小。从不同空腔的体积分布来看,L-B-2 与 L-B-3 的分布较为均匀,每种体积的空腔数量差别不大,导热系数较小;L-A-4 与 L-C-2 的分布不均匀,主要特点是体积小的空腔数量多,体积大的空腔数量少,导热系数较大。

3) 空腔体积极差分析。表 4 为 2 mm 壁厚的不同类型墙体构件的空腔体积极差和导热系数的关系,其中 L-B-2 的空腔体积极差最大,为 $30.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,导热系数最小,热工性能最好;L-B-3 的空腔体积极差次之,为 $22.19 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,导热系数仅次于 L-B-2。按照空腔体积的极差大小排列,可以看出导热系数基本上随着极差的减小呈现增加趋势。在 L-system 算法生形的模型中,同种算法的相同语言规则下,随着迭代次数的增多,空腔的排布变得更加复杂,空腔体积极差变小,导热系数增大。

表 4 L-system 算法生形的墙体构件空腔体积极差与导热系数的关系(壁厚 2 mm)

类型	空腔体积极差/ 10^{-4} m^3	导热系数 λ / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
L-B-2	30.17	0.205
L-B-3	22.19	0.223
L-A-3	10.56	0.327
L-C-2	8.82	0.400
L-C-1	8.29	0.375
L-A-4	2.39	0.431

4 结论

本文采用泰森多边形和 L-system 算法对 3D 打印混凝土(3DPC)墙体构件空腔形态进行了设计,并对其热工性能进行了数值模拟,研究空腔形态变化对墙体构件热工性能的影响,具体结论如下:

- 1) 相同算法设计的模型中,随着壁厚的增加,空腔体积比降低,导热系数随之增大。
- 2) 空腔密度分布能够影响墙体构件的导热系数。在 L-system 算法生形的 3DPC 墙体构件中,拥有数量多而体积小的空腔的墙体构件导热系数大于拥有数量少而体积大的空腔的墙体构件。在泰森多边形算法生形的 3DPC 墙体构件中,空腔密度按照体积大小递增分布(V-递增)时,墙体构件的导热系数小于按照中间体积大两侧体积小分布(V-内疏)和中间体积小两侧体积大分布(V-内密)的墙体构件的导热系数。
- 3) 空腔体积的极差能够影响构件的导热系数,随着空腔体积极差的减小,构件的导热系数增大。
- 4) 空腔排布方式能够影响构件的导热系数。空腔递减排布构件的导热系数小于递增排布的导热系数。

本研究证明了不同空腔形态能够影响 3DPC 墙体构件的热工性能,但仅进行了数值模拟,还需要进一步的 3D 打印实验验证。此外,3DPC 产生的空腔可能会对墙体的结构稳定性产生影响,所以,对于墙体结构的空腔形态还需进行优化设计,综合结构性能和热工性能,探寻空腔形态的设计策略。

参考文献(References):

- [1] KHOSHNEVIS B, HWANG D, YAO K T, et al. Mega-scale fabrication by contour crafting[J]. *International Journal of Industrial Systems Engineering*, 2006, 1(3): 301-320.
- [2] 王天恒, 王胜, 陈旭, 等. 低水泥用量 3D 打印混凝土流变性能及打印性能研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2024, 45(1): 52-58.
WANG Tianheng, WANG Sheng, CHEN Xu, et al. Study on the rheological property and printability of 3D printed concrete with low cement content[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2024, 45(1): 52-58.
- [3] SUN J T, XIAO J Z, LI Z R, et al. Experimental study on the thermal performance of a 3D printed concrete prototype building[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 241: 110965.
- [4] BUSWELL R A, SOAR R C, GIBB A G F, et al. Freeform construction; Mega-scale rapid manufacturing for construction[J]. *Automation in Construction*, 2007, 16(2): 224-231.
- [5] MOHAMADREZA M, JAN O, JEFFREY P Y, et al. Additive manufacturing and performance of architected cement-based materials[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(43): 1802123.
- [6] WANG L, JIANG H L, LI Z J, et al. Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section[J]. *Archives of Civil Mechanical Engineering*, 2020, 20: 1-17.
- [7] XIAO J Z, LIU H R, DING T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101712.
- [8] DUBOR A, CABAY E, CHRONIS A. Energy efficient design for 3D printed earth architecture[C]//*Humanizing Digital Reality: Design Modelling Symposium Paris 2017*. Singapore: Springer, 2018: 383-393.
- [9] RASHID A A, KHAN S A, AL-GHAMDI S G, et al. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment[J]. *Automation in Construction*, 2020, 118: 103268.
- [10] KHAN S A, KOÇ M, AL-GHAMDI S G. Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303: 127027.
- [11] ZHANG N, ZHANG L C, CHEN Y, et al. Local barycenter based efficient tree-support generation for 3D printing[J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 115: 277-292.
- [12] DEVILLERS O, GOLIN M, KEDEM K, et al. Queries on Voronoi diagrams of moving points[J]. *Computational Geometry*, 1996, 6(5): 315-327.
- [13] AURENHAMMER F. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure[J]. *ACM Computing Surveys*, 1991, 23(3): 345-405.
- [14] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development I: Filaments with one-sided inputs[J]. *Journal of theoretical biology*, 1968, 18(3): 280-299.
- [15] ZUBAIROVA U S, PENENKO A V, NIKOLAEV S V. Моделирование роста и развития растительных тканей в формализме I-систем[J]. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2012, 16(4/1): 816-824.
- [16] ZARR R. A history of testing heat insulators at the national institute of standards and technology[J]. *Ashrae Transactions*, 2001, 107: 1-11.
- [17] ALZHRANI A A, ALGHAMDI A A, BASALAH A A. Computational optimization of 3D-printed concrete walls for improved building thermal performance[J]. *Buildings*, 2022, 12(12): 2267.
- [18] PRUSINKIEWICZ P, CIESLAK M, FERRARO P, et al. *Mathematical modelling in plant biology*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 139-169.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)