arXiv:2305.03455v1 [cs.CE] 5 May 2023

# 熔融长丝制造中热传递的高效模拟

Nathalie Ramos[1,2*], Christoph Mittermeier[2] 和 Josef Kiendl[2,1]

[1]挪威科技大学海洋技术系，Otto Nielsens Veg 10，特隆赫姆，7491，挪威。[2]慕尼黑联邦国防军大学工程力学与结构力学研究所，Werner-Heisenberg-Weg 39，Neubiberg，85577，德国。

*通讯作者。电子邮箱：nathalie.ramos@ntnu.no;

**摘要**

熔融长丝制造过程的热传递模拟是预测三维打印部件的结合、残余应力和强度的重要工具。然而，为了捕捉FFF打印过程中出现的显著热梯度，需要采用细网格离散化和较短的时间步，从而带来大量计算工作。在本研究中，提出了一种仿真框架，将多种效率措施相结合，旨在减少模拟FFF打印过程所需的计算工作量，同时不简化沉积物理过程，也不降低整体精度。因此，采用混合单元激活方法对材料沉积进行建模，并根据基于误差的粗化条件对单元进行自适应粗化。此外，还针对具有充气填充图案的几何体提出了一种适当的粗化技术。通过实验验证了数值框架的精度，并通过比较采用和未采用任何效率措施的模型性能，以数值方式验证了该框架的效率。最后，通过模拟较大几何体的打印过程，展示了该方法的有效性。

**关键词：**熔融长丝制造、热传递、有限单元、自适应粗化、单元激活

# 1 引言

熔融长丝制造（FFF）是增材制造（AM）或三维（3D）打印技术之一。在该技术中，热聚合物沿预定路径逐层挤出，以形成三维物体。由于低价材料供应广泛、操作简便且能耗低等优点，熔融长丝制造是最常用的增材制造技术 [1],[2],[3]。尽管熔融长丝制造正从主要用于原型制作的工具转变为制造工具，但与采用传统聚合物制造方法生产的部件相比，熔融长丝制造打印部件的机械各向异性和低机械强度，阻碍了这一转变 [2],[4],[5]。其原因之一是熔融长丝制造过程具有间断性：熔融丝材被挤出并沉积在先前沉积的层上，与相邻丝材形成结合 [6]。层与层之间的结合界面往往是熔融长丝制造打印部件中最薄弱的环节，而且 z 方向的强度通常远低于其他方向 [2]。此外，沉积过程中发生的快速加热和冷却会产生较大的热梯度，从而可能导致残余应力 [7]。这也会影响机械强度。在这两种情况下，了解热传递及其对 3D 打印部件结合性能和强度的显著影响，对于拓展熔融长丝制造的适用性至关重要 [5], [8]。

有多项研究探讨了 FFF打印过程中的热传递，方法包括实验研究 [6], [9], [10], 、解析研究 [11] 或数值研究。其中，Amico 和 Peterson 使用 COMSOL Multiphysics 中的有限元（FE）分析，模拟了单道厚度墙体的沉积 [12]。他们利用 COMSOL 的“变形几何体”节点模拟喷嘴移动和材料沉积。Xu 等人还使用在 C 中实现的三维有限元模型，模拟了薄壁 FFF打印过程中的热传递++ ；该模型最初用于研究金属选择性激光熔化过程中的热交换 [9]。然而，聚合物材料的沉积是通过将有限元定义域的属性从空气改为聚合物来实现的。Zhou 等人使用有限元软件 ANSYS 中的单元生死功能，模拟了立方体形薄壁结构的沉积过程 [13]。Cattenone 等人还在 Abaqus 中采用单元顺序激活，模拟弹簧和桥梁的打印 [14]。关于适用于此类热传递模拟的其他有限元方法，文献 [15]中提供了详尽的综述。

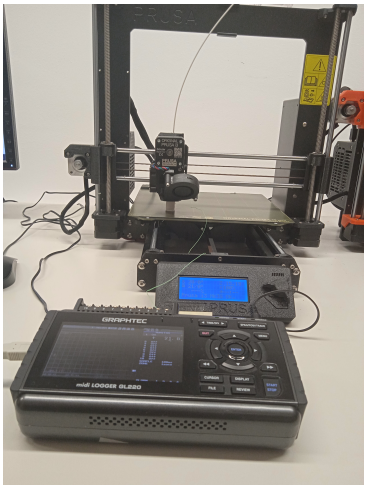
为了在这些模拟中准确捕捉显著的热梯度，需要采用非常精细的网格离散化和较短的时间步，因此需要投入大量计算资源，并满足较高的物理内存需求 [14],[16]。因此，许多上述数值方法的模拟都是在小规模下进行的。为实现计算高效的框架来模拟增材制造（AM）过程，人们提出了多种策略。对于简单几何体，可以采用降维方法，将三维几何体简化为二维 [17]。空间简化是另一种降低计算开销的方法。在多项研究中，一种混合单元激活策略被用作全局

重新网格划分方法 [16],[18],[19]。分析开始时，不让表示最终几何体的所有单元都处于非激活状态，而是将最终几何体离散为多个后续网格，每个网格都新增一层静默层。最后，人们也常采用自适应网格划分，以尽量降低计算开销。自适应细化通常用于在热源的熔融区或热影响区附近生成局部细化网格 [20], [21]。反之，距离热源较远的整层也可以通过合并而自适应粗化，同时在热源周围保持均匀细网格。这种方法最初应用于焊接数值模拟，如今也常用于金属增材制造的模拟 [16],[22]。

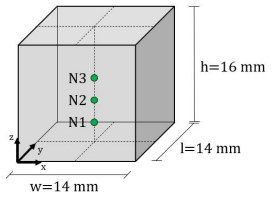
上述技术大多应用于金属打印模拟，而金属打印的几何体通常较大，因此精度损失往往难以避免。本文提出了一种结合多种技术的仿真框架，旨在降低 FFF 打印过程热仿真的计算开销，同时不牺牲其整体精度。本文开发了一种自适应粗化框架：当满足基于误差的条件时，沿打印部件的高度逐步粗化单元，而非在预先设定的时刻进行粗化，后者可能导致过早粗化并造成更大的精度损失。此外，本文采用混合单元激活方法进行重新网格划分，以进一步减少有限元网格中的自由度数量，并提出了一种适用于具有充气填充图案的几何体的粗化技术。本文详细介绍了整个框架以及描述瞬态热传递分析的控制方程。通过实验验证数值框架的精度，并通过比较采用和未采用任何效率措施的模型性能，以数值方式验证该框架的效率。最后，在更大的几何体上测试该仿真框架的有效性。

## 2 实验装置

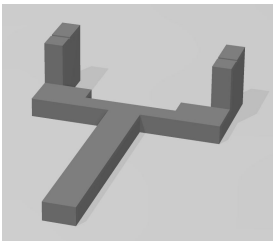
为验证本研究中提出的数值模拟，我们在打印块体几何的过程中进行了热测量，如图 1 所示。所有样品均使用 Prusa i3 MK3 打印机打印。所用材料为聚乳酸（聚乳酸），其热学性质由制造商 Fillamentum 提供，列于表 1 中。该几何体采用表 2 所列的工艺参数进行打印。实验装置如图1所示。打印块体时，使用K型热电偶在三个测量位置测量温度。N1位于 $z=\frac{1}{10}\cdot h$ 处，N2位于 $z=\frac{2}{5}\cdot h$ 处，N3位于 $z=\frac{3}{5}\cdot h$ 处，其中 h 为块体的高度。三个测点均位于相同的竖直平面内；$x=\frac{4}{7}\cdot w$ 和 $y=\frac{4}{7}\cdot l$，其中 w 和 l 分别为块体的宽度和长度。温度由 Graphtec GL220




(a) 实验装置




(b) 含 N1 的块体几何 N2，N3



(c) 测量设备

**图 1**：实验模型与装置

| **属性** | **PLA** | **Air** |
|---|---|---|
| 密度 $\rho$ [kg/m$^3$] | 1240 | 1.41 |
| 比热容 $c_p$ [J/kg·K] | 1800 | 716 |
| 导热率 $K_0$ [W/m·K] | 0.13 | 0.023 |

**表 1**：聚乳酸和空气的热学性质

数据记录仪记录，采样频率为 10 Hz。具体测量步骤如下：首先将块体打印至测量点所在层。随后暂停打印十秒，以便在正确的测量位置插入热电偶。具体做法是将导线架设在已打印的测量装置（图 1）上，该装置可控制热电偶相对于块体放置的高度和深度。放置热电偶后，恢复打印并开始记录。每个测量位置均重复这一过程四次。因此，总共打印了 12 个样品并记录其温度。

# 3 数值方法

第2 节介绍的 FFF打印过程中的热传递，通过进行瞬态热分析进行了数值模拟。本节将介绍有限元模型，以及用于

| 工艺参数 | 符号 | 数值 |
|---|---|---|
| 打印速度 | $v_p$ | 30 毫米/秒 |
| 层高 | $dh$ | 0.2 毫米 |
| 丝材宽度 | $wf$ | 0.5 毫米 |
| 喷嘴温度 | $T_n$ | 210 °C |
| 环境温度 | $T_a$ | 25 °C |
| 床温 | $T_b$ | 60 °C |
| 热传递系数 | $h$ | 25 W/m$^2$ K |

**表 2**：熔融丝材制造工艺参数

降低 FFF 瞬态热分析模拟计算量的效率措施。

## 3.1 热传递分析

熔融丝材制造的热驱动沉积过程中会发生多种热交换模式 [5]。由于本研究重点关注沉积过程中的热传递，因此，挤出前和挤出过程中喷嘴内部发生的所有热传递机制均不在本研究范围内。

从能量平衡出发，瞬态热传递可由以下偏微分方程（PDE） [23]描述：

$$\rho c_p \frac{\partial T(\mathbf{x},t)}{\partial t} = \nabla \cdot (K_0 \nabla T(\mathbf{x},t)) + Q \tag{1}$$

其中， $T$ [K] 为温度， $\rho$ [kg/m$^3$]为材料密度， $c_p$ [J/kg K] 为比热容， $K_0$ [W/m K] 为导热率， $Q$ [W/m$^3$]为热源。左侧表示热能储存的变化，右侧第一项表示通过传导进行的热传递。热通量矢量可表示为

$$\mathbf{q} = -K_0 \nabla T(\mathbf{x},t) \tag{2}$$

求解式中偏微分方程给出的初值问题。 1 需要指定所研究定义域内每一点的初始条件，并指定边界上的温度（狄利克雷边界条件）或其导数（诺伊曼边界条件）。对流产生的热流由牛顿冷却定律给出，该定律指出，单位时间内单位表面流出的热能与表面温度 $T_s$ [K] 和表面外温度 $T_\infty$ [K]之间的差：

$$-K_0 \nabla T(\mathbf{x},t) \cdot \mathbf{n} = h(T_s - T_\infty) \tag{3}$$

其中 $\mathbf{n}$ 是指向外法向的单位矢量， $h$ [W/m$^2$K] 是对流换热系数。最后，辐射产生的热通量由斯忒藩–玻尔兹曼定律定义：

$$-K_0 \nabla T(\mathbf{x},t) \cdot \mathbf{n} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \tag{4}$$

其中 $\varepsilon$ 是发射率， $\sigma$ 是斯特藩-玻尔兹曼常数。

## 3.2 材料沉积建模

通过单元顺序激活，模拟材料在构建平台或先前沉积的层上连续沉积的过程。在此类分析中，表示完整打印几何体的所有有限元都会在有限元网格中离散化，并在分析开始时停用。随后，沿打印喷嘴的路径，在后续时间步中依次激活单元，以模拟沉积过程，直至整个几何体均被激活。最初，通过将导热率和比热容降至接近零的数值来停用单元。因此，这些单元仍保留在有限元网格中，其附带的自由度也仍存在于全局方程组中，但不会影响求解结果。相反，单元激活后，材料属性将恢复为原始数值。

此类分析的数值稳定性和精度取决于时间步长。时间步长通过计算激活或沉积单个单元所需的时间来确定：

$$\Delta t = \frac{dl}{v_p} \tag{5}$$

其中 $dl$ 是喷嘴运动方向上单元的尺寸，而 $v_p$ 是打印速度。本研究的目的并非确定最优时间步长，因为已有其他研究对此主题进行了大量专门研究 [14]。 $\Delta t$ 本文所采用的时间步长远小于捕捉聚乳酸冷却速率所需的时间步长，因此假定其足够小。

## 3.3 载荷与边界条件

在单元激活时，通过直接在已激活单元的节点处指定挤出温度来模拟材料沉积；即将载荷作为狄利克雷边界条件施加。载荷施加于已激活单元的所有节点，而非仅施加于前一时间步中尚未求解自由度的节点（图 2）。尽管在所有节点处指定温度可能会因覆盖某些节点处已有的求解结果而导致收敛问题，但在本研究所展示的任何模拟中均未出现此类问题（第 4 节）。此外，对于 8 节点热有限元（如本研究所采用的有限元），在相邻单元的情况下，部分加载将导致仅有一个节点受到加载，这可能会低估引入的热能。因此，本研究未采用这种方案。

在大多数熔融丝材制造打印应用中，辐射的影响可以忽略，因为对流的影响占主导地位 [11]。因此，表示对流传热的诺伊曼边界条件可表示如下：

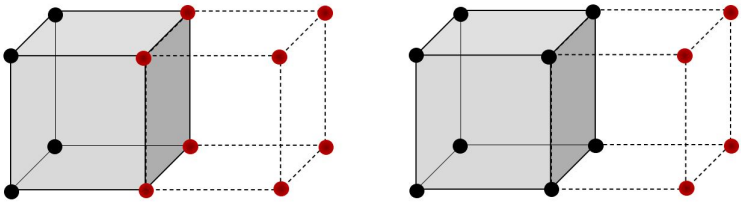
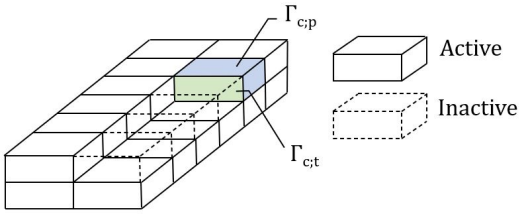


**图 2**：左：完整狄利克雷加载；右：部分狄利克雷加载。红色节点在激活时加载，已有节点解的节点以黑色标示




**Fi图 3**：在单元表面施加对流边界条件

$$K_0 \nabla T(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} + h(T_b - T_\infty) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_c \tag{6}$$

其中 $\Gamma_c$ 是已激活单元的自由表面。几何体 $\Gamma_{c;\,p}$ 边缘处的自由表面 $\Gamma_{c;\,t}$与毗邻未激活单元的临时自由表面（图 3）。在瞬态分析过程中，后者会持续更新和识别。通过在几何体 $\Gamma_b$的底面施加固定温度，对加热打印平台进行建模:

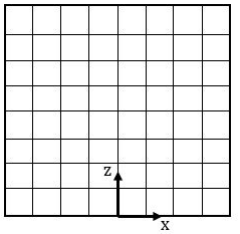
$$T(\mathbf{x}, t) = T_b \quad \mathbf{x} \in \Gamma_b \tag{7}$$

## 3.4 效率措施

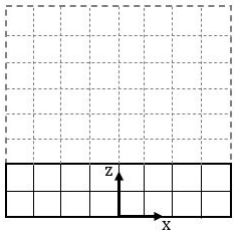
### 3.4.1 重新网格划分

为了避免在求解完整几何体所需的所有时间步中都包含全部自由度，Denlinger 等人提出了一种混合单元激活方法 [16]。与在一次模拟中求解包含许多未激活层的完整网格（通常称为静默激活方法）不同，重新网格划分会按预定次数进行，直至最终几何体完全求解。两种激活方法的示意图见图4。在混合激活方法的每个重新网格划分步骤中，会向网格中添加用户指定数量的未激活层或静默层 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$ ，然后依次激活这些层。重新网格划分所需的次数取决于 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$。

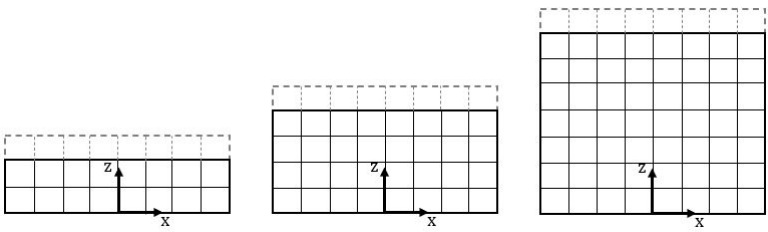
为确保两个网格之间解的连续性 o




(a) 最终离散的几何体




(b) 静音激活方法；激活单元沿直线排列，未激活单元以虚线表示




(c) 混合激活方法；后续重新网格划分步骤

**图 4**：各种单元激活方法

在后续的重新网格划分步骤中，必须先将前一网格的解映射到新离散化的几何体上，才能继续分析。两个后续网格几何体重合部分中的节点，将以前一重新网格划分步骤的解或节点温度作为初始条件。静默层中的节点将被赋予环境温度 $T_a$。因此，初始条件表示为：

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_a \quad \mathbf{x} \in \Omega_q \tag{8}$$

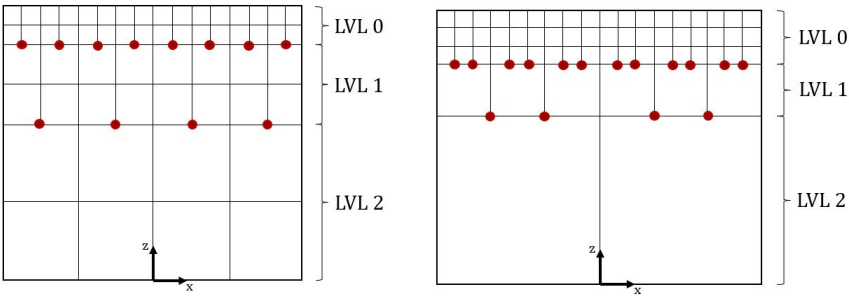
其中，$\Omega_q$ 表示离散定义域中的静止部分。在定义域的活动部分 $\Omega_a$中，初始条件可表示为：

$$T^i(\mathbf{x}, 0) = T^{i-1}(\mathbf{x}, t_e) \quad \mathbf{x} \in \Omega_a \tag{9}$$

在当前重新网格划分步骤 $i$ 的 $t = 0$ 处，温度等于前一个重新网格划分步骤 $i-1$最后一个时间步 $t_e$ 处的温度。

### 3.4.2 自适应粗化

本研究采用渐进式粗化策略：随着与打印喷嘴的距离增加，单元尺寸逐渐增大。粗化方式由粗化模式决定；由于采用自适应粗化，粗化时机则由粗化条件决定。




（a）粗化因子=2　　（b）粗化因子=3

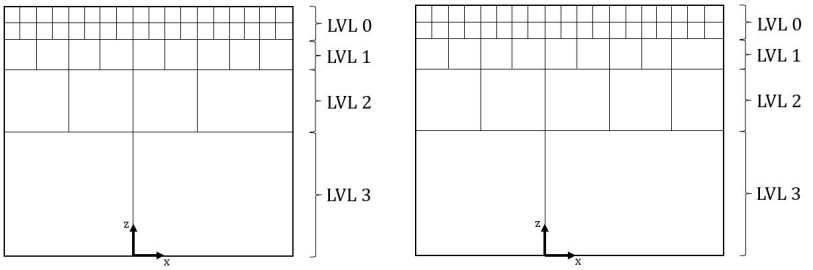
**图 5**：尺寸相近的几何体及其渐进式粗化模式（粗化因子不同）。悬挂节点以红色显示。

粗化模式由两个参数控制，即粗化层级数 MLVL，以及粗化因子 CF；后者决定从一个粗化层级到下一个层级时合并多少个单元。图5 展示了一个二维粗化几何体示例，其中包含两个粗化层级，并采用不同的 CF 数值。CF=2 应用于本研究中的所有粗化网格，因此在后续粗化层级中，x、y 和 z 方向上的各两个单元会合并为一个粗单元。粗化不可避免地会在细层与粗层之间和/或不同粗化层级的粗层之间的界面处产生悬挂节点（图 5）。这些节点连接到界面层上方的单元，但不连接到界面层下方的网格。通过在求解全局方程组之前定义运动学约束，可确保分析过程中沿该粗单元的解保持连续。

图 5 展示了均匀网格，其中所有粗化层级中的单元数都可以被粗化因子整除$^{\mathrm{MLVL}}$。对于大多数网格而言，通常并非如此；因此，需要对 x 方向和 y 方向上的粗化模式进行细微调整，以尽量减少悬挂节点的数量。第一个需要对奇数个单元进行粗化的层级将包含一个粗单元，该粗单元合并了奇数个单元。该单元的最大尺寸（长度或宽度）为：

$$l_{\max} \leq 1.5 \cdot 2^{k} \cdot l \tag{10}$$

其中 $l_{\max}$ 表示单元的最大长度，$k$ 表示单元被粗化时的粗化级别。所有相邻单元均遵循粗化因子=2。如图 6a 中的 LVL 2 和图 6b中的 LVL 1 所示。如果不满足该条件，前一级中的不规则单元将被传递到下一个粗化级别，而不会与其他单元合并（图6b中的 LVL 2）。这也意味着，在界面层中偏离单元所在的位置不会出现悬挂节点。




（a）网格在 x 方向上包含 18 个单元，位于最精细层中。 (b) 网格包含 x 方向上的 19 个单元最细层中的方向。

**图 6**：单元配置不均匀的网格中的粗化模式

当两个连续重新网格划分步骤的网格中所有节点的温度差小于用户定义的阈值时，就会进行粗化。对于重新网格划分步骤 $i$ 当前网格中待粗化层内的每个节点，都会检查粗化条件，并将其与可能粗化后的网格进行比较。在实际执行粗化之前，通过与可能的网格进行比较，确定是否适合进行粗化，具体在重新网格划分步骤 $i+1$中进行。除了待粗化的下一层外，可能网格中的单元配置与当前网格相同（图 7）。该层中的单元会提前赋予粗化后的单元尺寸。粗化条件可表示如下：

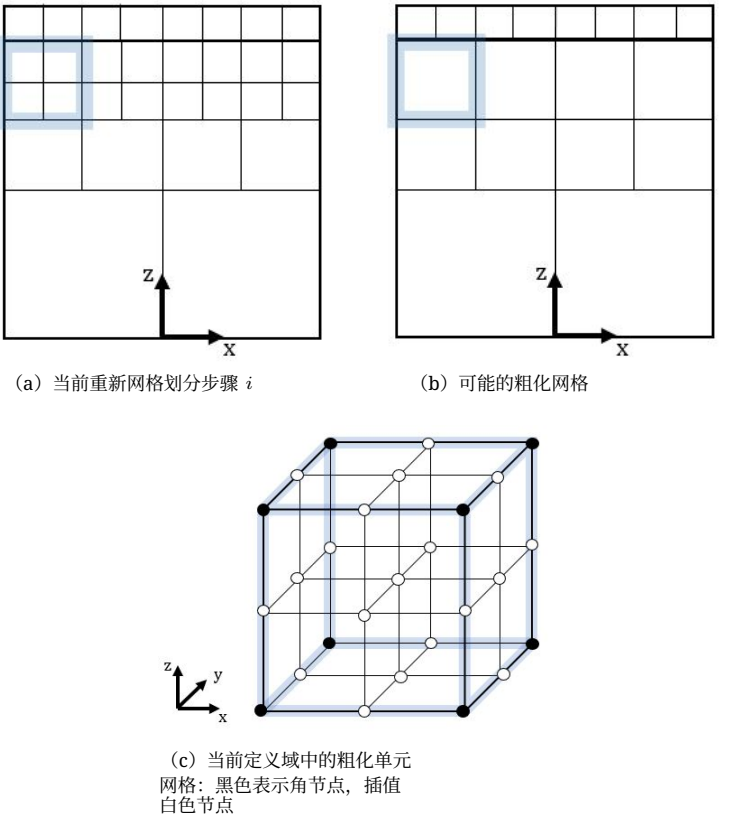
$$\left|\frac{T_j - \hat{T}_j}{T_j}\right| < \varepsilon \tag{11}$$

其中 $T_j$ 是当前网格中节点 $j$ 处的温度，且 $\varepsilon$ 是用户定义的粗化阈值。 $T_j$ 是潜在网格中节点 $j$ 投影位置处的温度。由于该节点不存在于潜在网格中，$T_j$ 必须通过对粗单元的八个角节点的节点温度进行线性插值来计算（图 7c）。$\varepsilon$ 可由用户按需设定得任意小。第 $\varepsilon$ 节将研究 4的影响。

如果潜在粗化层中的所有节点都满足粗化条件，则适合对该层进行粗化。对于不同粗化层级中的其他层，也可以重复相同的过程。一旦不再满足粗化条件，就会保存重新网格划分步骤 $i$ 中最后一个获准的潜在网格的节点坐标和温度，以便在重新网格划分步骤 $i+1$中进行映射。随后即可结束重新网格划分步骤 $i$中的热瞬态分析。

### 3.4.3 填充几何均质化

含有空气、采用直线填充图案的层的示例如图所示：8。在模拟此类层的沉积时




（a）当前重新网格划分步骤 $i$　（b）可能的粗化网格

（c）当前定义域中的粗化单元
网格：黑色表示角节点，插值
白色节点

**图 7**：自适应粗化：当前网格与潜在网格的对比

除了 PLA 单元之外，还必须激活空气单元。与聚合物单元相邻的空气单元会在同一时间步内同时激活，因为它们不会影响实际打印时间。满足粗化条件的单元可按照第 3.4.2 节所述的相同方式进行粗化。主要区别在于，待合并的单元可以仅由空气构成、仅由聚合物构成，或由这两种材料共同构成。研究发现 [24]，对具有复杂充气填充结构的几何体进行建模时，只要遵循填充密度，即使采用简化的填充结构，也能准确模拟热传递。因此，无需考虑合并单元的确切材料构成，而是为粗化后的单元赋予有效或均质化材料属性，其中已考虑打印部件的填充密度所产生的影响 $\alpha$ （图8）。细层始终遵循确切的填充图案，在激活单元时严格按照打印喷嘴的沉积路径进行。

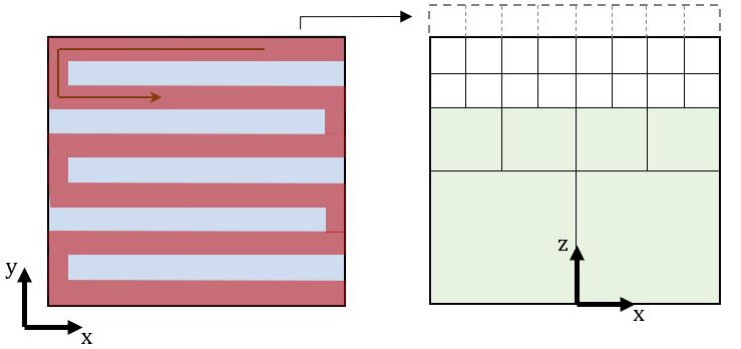



**图 8**：左：具有填充图案的层（聚合物为红色，空气为蓝色）；右：粗化层中的等效材料属性（以绿色表示）

有多种方法可用于计算非均质材料和多孔介质的有效属性 [25]。在本研究中，选择一种简单的方法来计算相关热属性的有效数值，即导热率和（体积）热容：

$$K_{0;\,eff} = (1-\alpha)\cdot K_{0;\,air} + \alpha \cdot K_{0;\,pol} \tag{12}$$

$$C_{eff} = (1-\alpha)\cdot C_{air} + \alpha \cdot C_{pol} \tag{13}$$

$$C_{air} = \rho_{air} \cdot c_{p;\,air} \tag{14}$$

$$C_{pol} = \rho_{pol} \cdot c_{p;\,pol} \tag{15}$$

$$\alpha = \frac{V_{pol}}{V_{air} + V_{pol}} \tag{16}$$

其中下标 $_{air}$ 和 $_{pol}$ 分别指空气和聚合物，其中 $C$ 为体积热容 [J/m$^3$ K]，而 $V$为打印部件中某种材料的体积。

## 3.5 数值设置

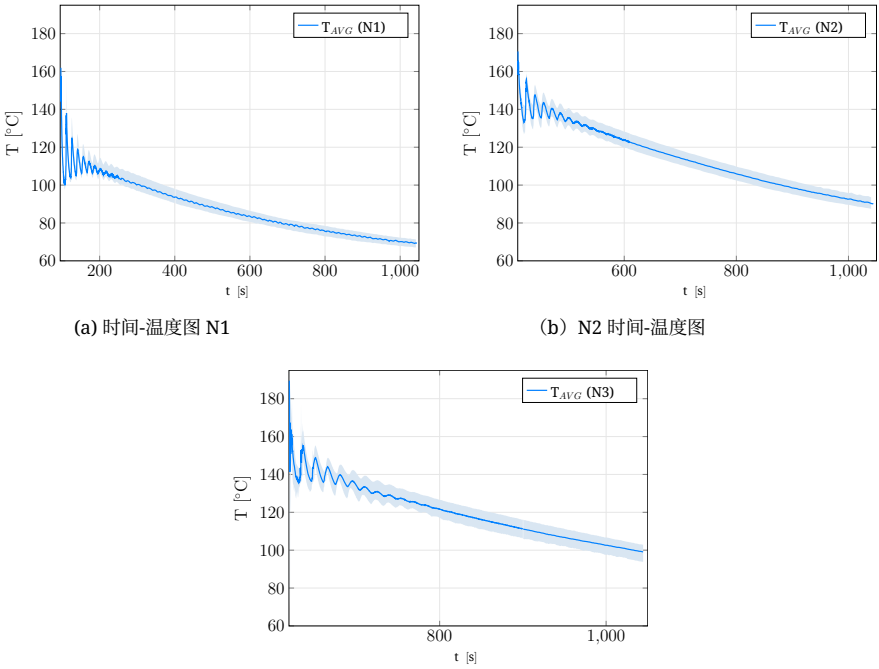
本研究中的所有模拟均使用 Ansys Mechanical APDL V19.2 完成。所有几何体均采用 SOLID70（3D 8 节点热有限元）进行离散化。赋予各单元的热属性列于表 1。这些属性也用于计算赋予填充几何体中粗化单元的均质化材料属性。未粗化单元的尺寸由打印几何体中丝材的几何形状确定。单元宽度 $wf$ 设为等于丝材宽度，单元长度 $dl$假设等于单元宽度，单元高度 $dh$ 则等于层高。

# 4 结果与讨论

## 4.1 实验结果

图9 显示了在块体打印过程中，利用热电偶在三个测量位置 N1、N2 和 N3 进行热测量所得的结果。对于每个测量位置，图中均绘出了测得的平均温度以及温度包络随时间的变化情况。这些 $T(t)$ 图并非从 $t = 0$ 开始（该时刻对应打印过程的起点），而是从丝材沉积到热电偶上方时开始。

可以看出，在 $T(t)$ 图中由第一个峰值捕捉到的实测沉积温度，在任何测量位置都不等于设定的 $T_n$ 210℃ 喷嘴温度。反复测量发现，沉积丝材的温度明显低于喷嘴温度。在 [26]中也观察到了这一现象。因此，在数值模拟中没有使用喷嘴温度，而是将所有实验测量所得的平均沉积温度 175℃ 用作激活温度。




(a) 时间-温度图 N1

（b）N2 时间-温度图

(c) 时间-温度图 N3

**Fi图 9**：不同测量位置的实验热测量

## 4.2 验证仿真框架

在通过实验验证仿真框架之前，本文通过研究效率措施对数值精度的影响，展示仿真框架的有效性。

数值验证

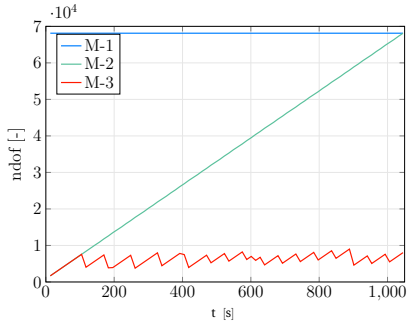
在第一个模拟中**M-1**，使用静默方法对块体几何进行了完整求解，因此模拟开始至结束期间没有进行重新网格划分。这是默认模拟，其他结果将与之进行比较。在第二个模拟中，使用混合激活方法求解网格；每次激活完整的一层时都会进行重新网格划分（**M-2**）。在第三个模拟中，使用粗化框架求解网格，因此既进行了重新网格划分，也进行了自适应粗化（**M-3**）。默认的重新网格划分和粗化参数列于表3。通过比较M-1、M-2和M-3模拟所需的总计算时间，衡量粗化框架的效率。结果列于表3 ，并见图10。

所有模型在求解完整几何体时共需 62,720 个时间步。可以看出，采用重新网格划分将计算时间缩短至 M-1 的 50%。同时采用重新网格划分和粗化，则将计算时间缩短至默认模型的 19%。图 10 显示，M-2 的自由度数量随时间线性增长，因为每次重新划分几何体网格时都会增加固定数量的自由度。对于 M-1，由于所有自由度从一开始就已存在，因此其数量随时间保持不变。观察 M-3 的结果，可以清楚地看到自适应粗化的影响；每次对网格进行粗化时，自由度数量都会显著减少。总体而言，自由度总数的平均值相当稳定，且显著低于 M-1 和 M-2。

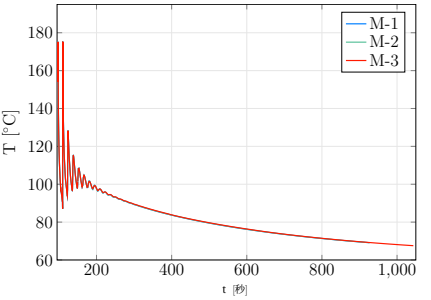
通过比较三种不同模型 M-1、M-2 和模型 M-3 中温度随时间的变化，评估仿真框架的数值精度 $T(t)$。 $T(t$结果见图 10。对于所有测量点，三种模型的结果都非常吻合。采用重新网格划分和粗化的模型，完全能够捕捉到最精细网格 M-1 所呈现的丝材再加热峰值和冷却过程。因此，在局部层面上，模型 M-3 与 M-1 和 M-2 都吻合良好。此外，还通过观察仿真过程中不同时刻的温度云图，对温度场进行了整体比较。结果见图 11 & 12。对于 M-1，仅显示了网格的活动部分。细网格与粗化网格的整体温度分布也高度吻合。模型 M-3 无需重新网格划分和粗化，即可准确捕捉细网格所呈现的正确局部和整体解。

| | M-1 | M-2 | M-3 | M-4 | M-5 | M-6 | M-7 | M-8 | M-9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $nh_{add}$ | n.a. | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CF | n.a. | n.a. | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | n.a. | 2 |
| CLVL | n.a. | n.a. | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | n.a. | 3 |
| $\varepsilon$ | n.a. | n.a. | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | n.a. | 0.05 |
| $\alpha$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| $t_c$ [-] | 1 | 0.5 | 0.19 | 0.19 | 0.22 | 0.16 | 0.16 | 0.35 | 0.24 |

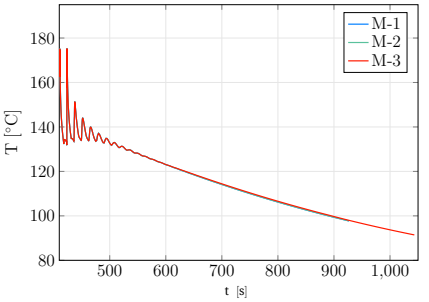
**表 3**：相对于默认模型 M-1 的计算时间 $t_c$，适用于采用不同重新网格划分和粗化参数的模型



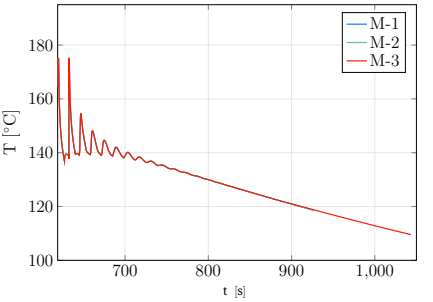

(a) 自由度数量随时间的变化




(b) 节点 1 的时间-温度图




(c) 节点 2 的时间-温度图




(d) 时间-温度图 节点 3

**图 10**：重新网格划分和粗化的影响：M-1 与 M-2 与 M-3

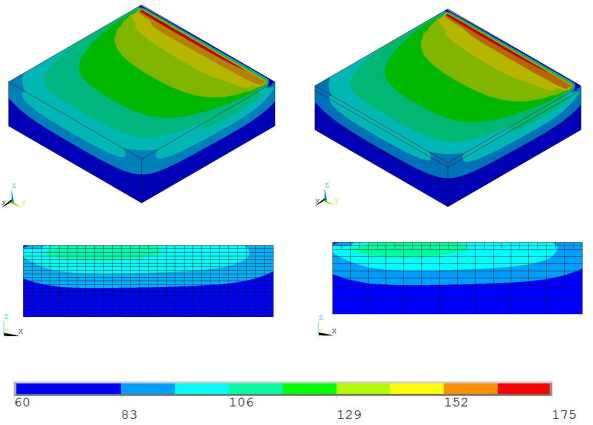



**图 11**：求解几何体 25% 后的温度。左：细网格（M-1），右：粗化网格（M-3）。位于 $y=\frac{4}{7}l$ 的横截面

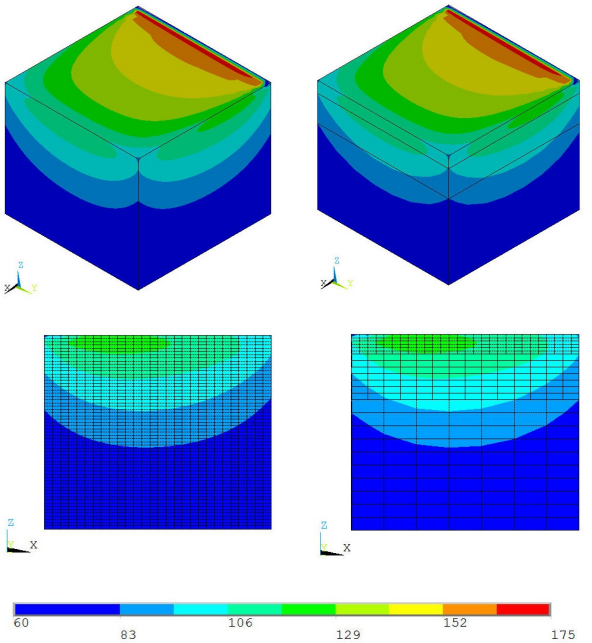
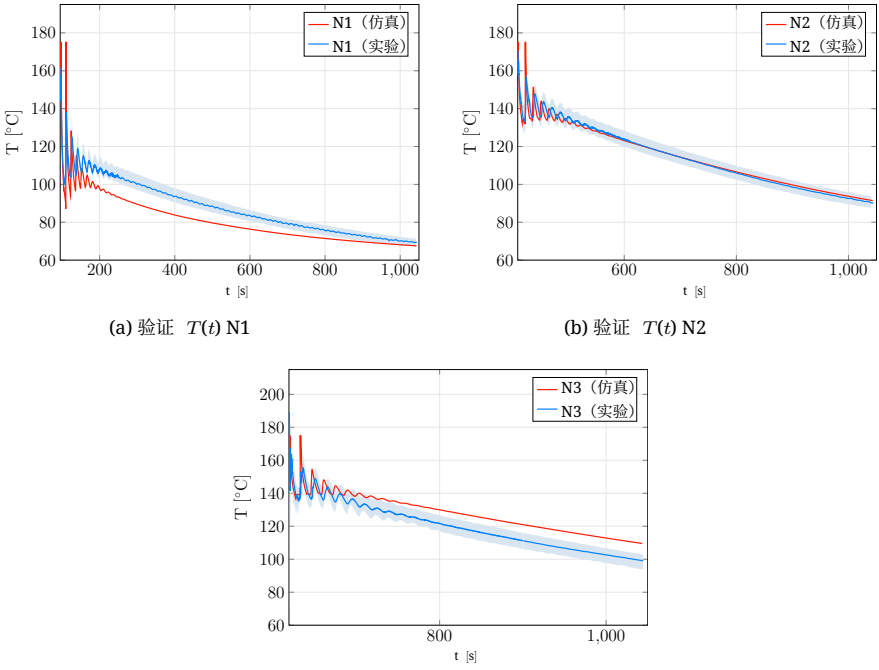



**图 12**：求解几何体 75% 后的温度。左：细网格（M-1），右：粗化网格（M-3）。位于 $y=\frac{4}{7}l$ 的横截面

实验验证

模型**M-3** 生成的数值结果与图13中各测量点的实验热测量结果进行了对比。$T(t)$ 的变化趋势被模拟很好地捕捉到了。可以看出，模拟中测量点 N1 的温度略有低估。该点也恰好是对热边界条件影响最敏感的点，因为它位于打印样品的底部（$z = \frac{1}{10 \cdot h}$）。测量点 N2 的实验结果与数值结果非常吻合，N3 的结果偏差也相当小（$\approx 5\%$）。对于所有测量点，可以看出，模拟与实验在第一次和第二次（再）加热峰值处的温度有所不同。模拟中采用平均沉积温度作为单元激活温度，因此预计会与实验数值存在偏差。实验测量期间，各测量点记录到的沉积温度各不相同。第二次再加热峰值处的偏差是数值载荷施加的直接结果；激活某个单元时，该单元的所有节点都会被指定为沉积温度（第 3.2节）。这似乎高估了实际发生的情况。




(a) 验证 $T(t)$ N1

(b) 验证 $T(t)$ N2

(c) 验证 $T(t)$ N3

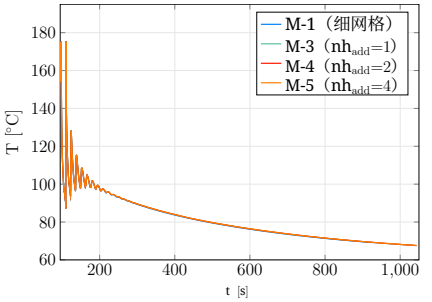
**图 13**：数值模型 **M-3** 的实验验证

数值参数的变化

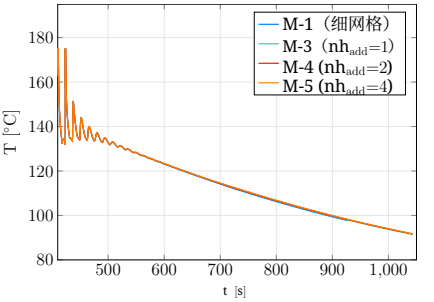
表3 中列出的默认重新网格划分和粗化参数应用于模拟 M-2 和 M-3。改变参数 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$ 和 $\varepsilon$ 可能会影响模拟相对于默认模型 M-1 的效率和/或精度。

第一个变化的参数是 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$。该参数会影响计算时间，因为它控制着重新网格划分步骤中非活动自由度的数量与重新网格划分发生次数之间的权衡。为研究这一点，还针对 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$=2(**M-4**) 和 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$=4(**M-5**)进行了模拟。表3 显示，具有一层（M-3）和两层静默层（M-4）的模型，其计算时间相近。然而，与仅添加一层静默层相比，添加四层静默层会使计算时间增加 15%。这表明，即使需要更频繁地进行预处理，频繁重新网格划分也比降低重新网格划分频率、增加每个离散几何体中的自由度数量更有效。我们还通过比较上述模型的 $T(t)$（图 14）以及最后一个重新网格划分步骤的最后一个时间步的温度云图（图 15）来评估精度。精细模型与采用不同 $\mathrm{nh}_{\mathrm{add}}$ 的粗化模型之间吻合度很高。

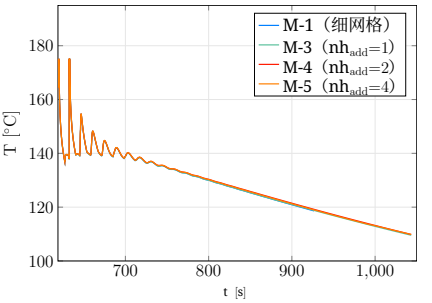
接下来，研究了粗化参数 $\varepsilon$ 的影响。由于采用 $\varepsilon$=0.01 的 M-3 仿真结果与精细模型的结果相比已经非常准确，因此将 $\varepsilon$ 的数值在 0.01 到 0.05 之间变化，用于**M-6** 和 **M-7** （表 3）。图 $T$（$t$）展示了精细模型 M-1 与粗化参数 $\varepsilon$ 变化的模型之间的对比，见图 16。可以看出，即使 $\varepsilon$=0.05，结果仍与精细模型吻合良好，尤其是在仿真初期。单元激活时的加热和再加热峰值都得到了准确捕捉。对于 $\varepsilon$=0.05（M-7），喷嘴的影响消退后可以观察到细微差异，因为 M-7 测得的温度比 M-1 高约 5%。这表明仿真过程中某个时刻过早发生了粗化。然而，节点 1 的结果表明，随着系统趋近稳态，这一差异再次减小。最后一个重新网格划分步骤中最后一个时间步的全局温度如图 17所示。结果仍然非常相似，但可以看出，M-3 只达到了两个粗化层级，而 M-6 和 M-7 均达到了三个粗化层级。这解释了计算时间上的差异，各模型的计算时间列于表 3。采用 $\varepsilon$=0.05 时，计算时间比采用 $\varepsilon$=0.01 时缩短了约 15%。




(a) 时间-温度图节点 1

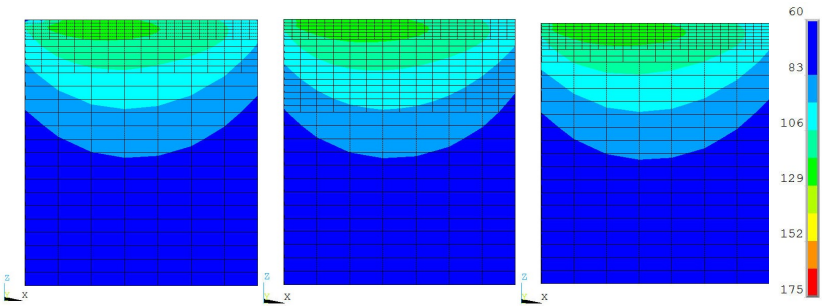



(b) 时间-温度图节点 2



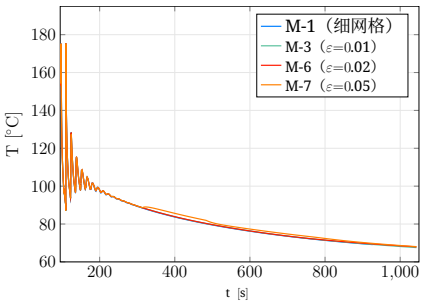

(c) 时间-温度图节点 3

**图14**：$\mathrm{nh_{add}}$ 的影响

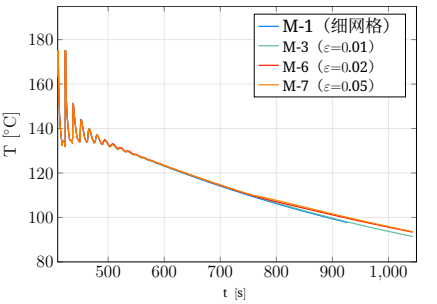



(a) M-3（$\mathrm{nh_{add}}=1$） (b) M-4（$\mathrm{nh_{add}}=2$） (c) M-5 ($\mathrm{nh_{add}}=4$)

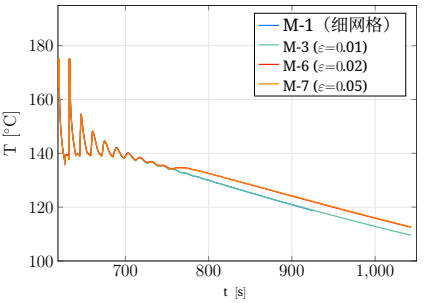
**图15**：不同 $\mathrm{nh_{add}}$ 模型的最终粗化网格在最后一个时间步的温度。$\mathrm{y}=\frac{4}{7}\mathrm{l}$ 处的横截面




(a) 时间-温度图 节点 1

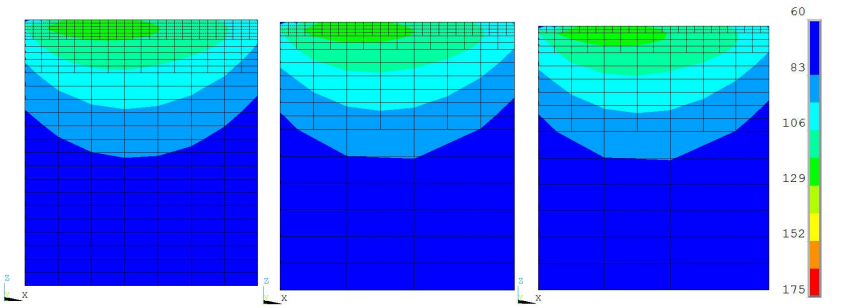



(b) 节点 2 的时间-温度图




(c) 节点 3 的时间-温度图

**图 16**: $\varepsilon$的影响




(a) M-3 ($\varepsilon$=0.01) (b) M-6 ($\varepsilon$=0.02) (c) M-7 ($\varepsilon$=0.05)

**图 17**: 具有不同 $\varepsilon$ 的模型在最后一个时间步的最终粗化网格中的温度。$y=\frac{4}{7}\cdot l$ 处的横截面

## 4.3 均质化填充结构

仿真框架对带有空气填充图案的几何体的适用性，采用与上一节相似的方法进行了测试：将细网格几何体的热分析结果，与同一几何体采用包含自适应粗化的离散化方式所得的热分析结果进行了比较。两次模拟均应用了重新网格划分。两个模型均采用填充密度为 50% 的直线填充图案。不进行任何粗化的模型记为 **M-8** ，而采用粗化的模型记为**M-9**。这些模型的所有重新网格划分和粗化参数均列于表 3。

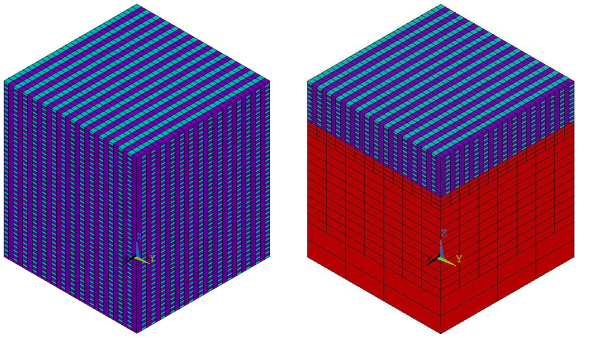
最后一个重新网格划分步骤生成的网格和温度云图如图 18 & 19所示。图 19 显示，M-8 与 M-9 的结果非常吻合。模型 M-8 中网格细化部分和粗化部分的温度与完全采用细网格时的温度高度一致。这证实，赋予粗单元的均质化材料属性能够很好地捕捉空气-聚乳酸填充结构的热行为。

模型 M-8 达到了三个粗化层级，尽管未粗化的细层数量相对较多（图 18）。与填充密度较高的几何体（图17中的 M-7）相比，填充密度为 50% 的粗化模型中保留了更多细层。与第一个粗化层级（网格从非均质网格转变为均质网格）相比，单元均质化后似乎更容易满足粗化条件。比较计算时间可见，M-8 的求解速度明显快于其高密度对应模型 M-2，尽管两者的自由度总数相同。这一差异可归因于 M-8 的总时间步数减少。尽管粗化模型 M-9 的效率仍高于 M-8，但不及高密度粗化模型 M-7。自由度数量的大幅增加似乎抵消了总时间步数的减少。

## 4.4 桥梁几何

上一节中介绍的所有数值方法均在一种桥梁几何体上进行了测试（图20）。该几何体的设计灵感源自 [14]，并采用了填充率为 25% 的直线填充图案（图 20）。分配给粗化单元的均质化材料属性通过方程12-16计算得出。用于模拟打印过程的所有工艺参数均列于表2中。采用了 0.267s 的时间步长。初始条件和边界条件的施加方式与块体几何体（第3.3节）类似。主要区别在于，桥梁几何体还具有额外的外部自由表面，这些表面受到对流传热的影响。粗化参数选取如下：

- MLVL=3



（a）采用精细离散化的几何体离散化　（b）采用较粗化离散化的几何体

**图 18**：最终重新网格划分步骤中，填充密度为 50% 的填充几何体网格。青色：PLA 单元；紫色：空气单元；红色：均质化单元

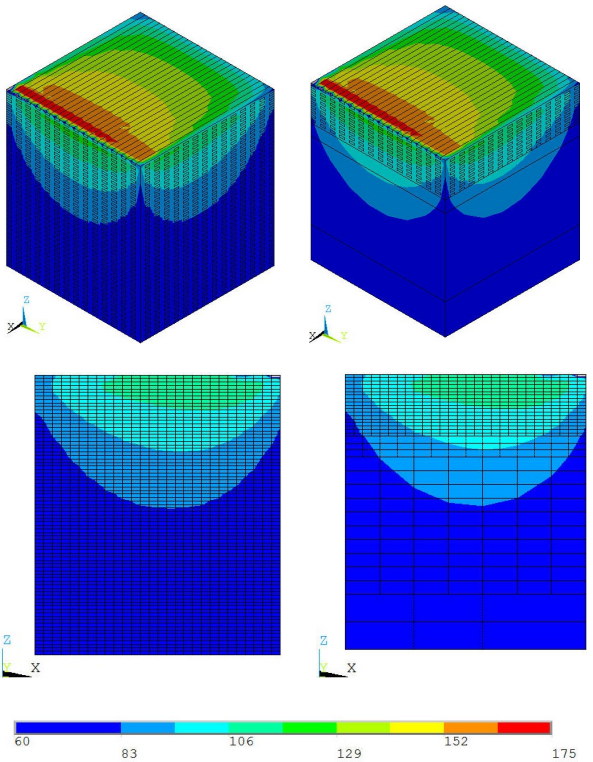
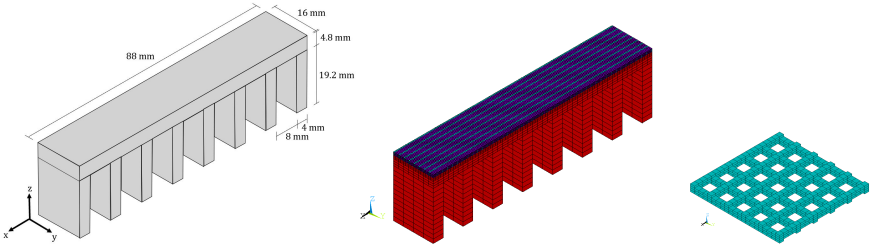



**图 19**：带有填充几何体的最终网格在最后一个时间步的温度。左：细网格；右：粗化网格。$y=\frac{4}{7}\cdot l$ 处的横截面

- 粗化因子=2
<escape>• nhadd=2</escape>
- $\varepsilon$=0.05

上一次重新网格划分步骤得到的最终粗化网格（图 20）表明，几何体的大部分区域都达到了三个粗化层级。与块体几何（图 18）相比，细层较少，这可能归因于桥梁的整体打印时间较长，每个打印层有更多冷却时间，因此更容易满足粗化条件。粗化层级的最大数量受桥梁支柱宽度的限制；不过，最粗层级中大量的层本可以支持进一步增加粗化层级。

温度云图如图21 所示，展示了打印过程不同阶段的情况。对于所示的每个重新网格划分步骤，均绘制了PLA长丝沿 0°方向（全局x方向）打印时的温度。可以看出，经过粗化的层具有均匀的温度分布，而已打印长丝的影响仅能达到打印层下方的少数（细）层。这一观察结果与实验测量一致。在不同的打印阶段，细层的数量始终相当稳定。总体而言，所提出的仿真框架似乎也能很好地适用于更复杂的几何体。

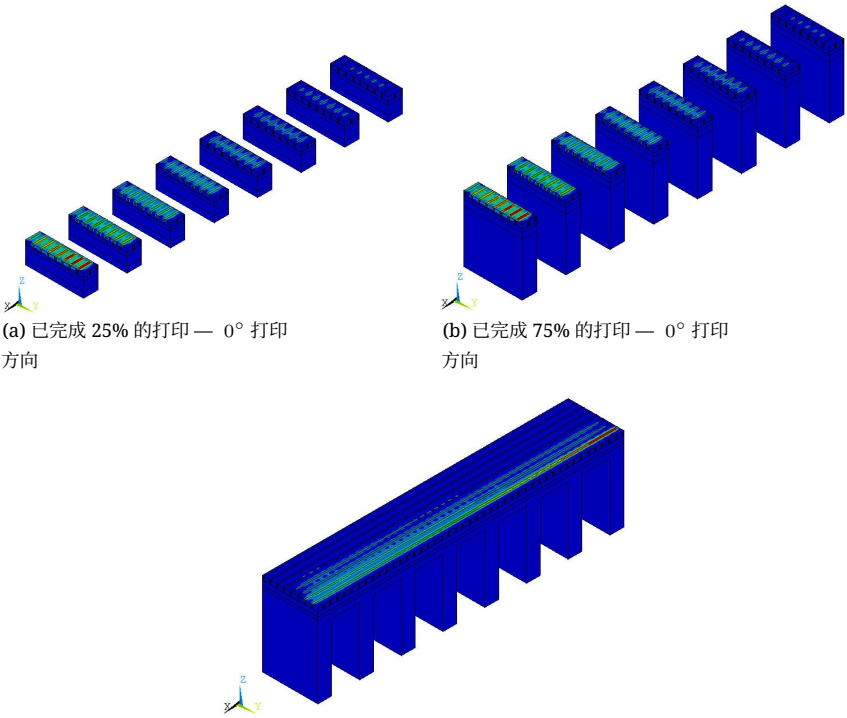



(a) 桥梁几何

(b) 最终粗化网格（青色：聚乳酸，紫色：空气，红色：均质化单元）

(c) 填充图案精细部分的 mesh （25% 填充密度仅显示聚乳酸）

**图 20**：桥梁模型




(a) 已完成 25% 的打印 — 0° 打印方向

(b) 已完成 75% 的打印 — 0° 打印方向

(c) 打印完成度达到 100% - 0° 打印方向

**图 21**：桥梁几何体在不同打印阶段的温度云图

# 5 结论

本文提出了一种用于熔融长丝制造（FFF）打印过程瞬态热分析的仿真框架。采用混合单元激活方法和自适应粗化，以降低通常与FFF打印过程热传递模拟相关的计算开销。此外，该方法旨在最大限度地减少精度损失，并准确表示沉积物理过程。

该仿真框架已通过实验热测量进行验证，这些测量是在打印块体过程中完成的。比较结果表明，两者吻合良好，尤其是在打印块体的中心区域。本研究的一项重要发现是，模拟中的激活温度必须显著低于

喷嘴温度。这一点在熔融丝材制造（FFF）打印过程的热传递模拟中通常未被考虑。

此外，还通过考察具有高密度填充和空气填充图案的几何体，评估了该框架在数值精度和效率方面的适用性。对于同时采用重新网格划分和自适应粗化的网格，模拟所需的计算时间约为未采取任何效率措施、采用细网格的几何体模拟所需计算时间的五分之一。此外，各模型在局部和整体上均表现出高度一致性。对于具有空气填充图案的部件，各模型之间也表现出良好的一致性。根据打印部件的填充密度确定、并赋予网格粗化部分的均质化材料属性，能够很好地捕捉非均质材料的热行为。

总体而言，该仿真框架在高效模拟 FFF 打印过程中的热传递方面展现出巨大潜力。通过优化时间步长并更准确地设定载荷，还可以进一步改进该框架。下一步是将仿真框架扩展到热-力学模拟，以预测残余应力。

# 参考文献

[1] Fitzharris, E.R., Watanabe, N., Rosen, D.W., Shofner, M.L.：材料属性对熔融沉积成型零件翘曲的影响。《国际先进制造技术杂志》95，2059–2070（2018）。https://doi.org/10.1007/s00170-017-1340-8[2] Gao, X., Qi, S., Kuang, X., Su, Y., Li, J., Wang, D.：聚合物材料的熔融长丝制造：层间结合综述。《增材制造》（37）（2021）。https://doi.org/10.1016/j.addma.2020. 101658[3]Zhang, Y., Shapiro, V.：熔融沉积成型部件制造完成后的线性时间热模拟。《美国机械工程师学会制造科学与工程学报》140，071002–107100211（2018）。https://doi.org/10.1115/1.4039556[4] Wong, K.V., Hernandez, A.：《增材制造综述》。《ISRN机械工程》2012，1–10（2012）https://arxiv.org/abs/208760。https://doi.org/10.5402/2012/208760[5] Vanaei, H.R., Shirinbayan, M., Deligant, M., Khelladi, S., Tcharkhtchi, A.：熔融长丝制造过程中温度变化的监测：从数值方法到实验方法。《Thermo》（1），332–360（2021）。https://doi.org/10.3390/thermo1030021[6] Yin, J., Lu, C., Fu, J., Huang, Y., Zheng, Y.：多材料熔融沉积成型（FDM）打印过程中由分子间扩散引起的界面结合。《材料与设计》150，104–112（2018）。https: //doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.029[7]Hajializadeh, F., Ince, A.：基于有限元的增材制造工艺数值建模框架。《材料设计与加工通讯》1(1)，28（2019）。https://doi.org/10.1002/mdp2. 28[8] Zhang, J., Zhou Wang, X., Wang Yu, W., He Deng, Y.：数值研究工艺条件对熔融沉积成型温度变化的影响。《材料与设计》130，59–68（2017）。https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.040[9] Xu, D., Zhang, Y., Pigeonneau, F.：熔融长丝制造打印过程的热分析：实验与数值研究。《国际材料成形期刊》，1–14（2020）。https://doi.org/10.1007/s12289-020-01591-8

熔融丝材制造中传热的高效模拟 27[10] Ferraris, E., Zhang, J., Van Hooreweder, B.：基于热成像的聚合物零件熔融长丝制造过程监测。《CIRP年鉴—制造技术》68，213–216（2019）。https: //doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.123[11] Costa, S.F., Duarte, F.M., Covas, J.A.：影响FDM/FFE中热传递的热条件：为该过程的数值建模提供参考。《虚拟与物理原型》10(1)，35–46（2015）。https://doi.org/10.1080/17452759.2014.984042[12] Amico, A.D.., Peterson, A.M.：一种可适配的有限元分析：三维材料挤出增材制造的热传递模拟。技术报告（2018）[13] Zhou, X., Hsieh, S.-J., Sun, Y.：聚乳酸在熔融沉积过程中热行为的实验与数值研究。《虚拟与物理原型》12(3)，221–233（2017）。https: //doi.org/10.1080/17452759.2017.1317214[14] Cattenone, A., Morganti, S., Alaimo, G., Auricchio, F.：基于熔融沉积成型的增材制造有限元分析：变形预测及与实验数据的比较。《美国机械工程师学会制造科学与工程学报》141(1)，1–17（2019）。https://doi.org/10.1115/1.4041626[15] Meyghani, B., Awang, M.B., Emamian, S.S., Mohd Nor, M.K.B., Pedap- ati, S.R.：摩擦搅拌焊（FSW）热分析中不同有限元方法的比较。《金属》7(10)，1–23（2017）。https: //doi.org/10.3390/met7100450[16] Denlinger, E.R., Irwin, J., Michaleris, P.：大型零件增材制造的热力学建模。《美国机械工程师学会制造科学与工程学报》136（2014）。https://doi.org/ 10.1115/1.4028669[17]Umer, U., Ameen, W., Abidi, M.H., Moiduddin, K., Alkhalefah, H., Alkahtani, M., Al-Ahmari, A.：使用有限元模型模拟不同支撑结构对钛合金电子束熔化的影响。《金属》9(806)（2019）。https://doi.org/10.3390/ met9070806[18] Jayanath, S., Achuthan, A.：用于模拟增材制造工艺的高计算效率有限元框架。《美国机械工程师学会制造科学与工程学报》140(4)（2018）。https://doi.org/10.1115/1.4039092/380516

[19] Michaleris, P.：热传递分析中的金属沉积建模

28 熔融长丝制造中传热的高效模拟 增材制造工艺。《有限元分析与设计》86，51–60（2014）。https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.04.003[20] Zeng, K.、Pal, D.、Gong, H.J.、Patil, N.、Stucker, B.：采用新型动态网格划分方法，将 3DSIM 对选择性激光熔化的热建模与 ANSYS 进行比较 采用新型动态网格划分方法，将 3DSIM 对选择性激光熔化的热建模与 ANSYS 进行比较（2014）。https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000703[21] Baiges, J.、Chiumenti, M.、Moreira, C.A.、Cervera, M.、Codina, R.：用于增材制造工艺数值模拟的自适应有限元策略。《增材制造》37，101650（2021）。https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101650[22] Lindgren, L.E.、Malmel¨ov, A.、Lundb¨ack, A.：通过集总化进行历史记录缩减，以实现增材制造的高效时间模拟。《金属》10(58)，1–17（2020）。https://doi.org/10.3390/met10010058[23]Habermann, R.：《应用偏微分方程：傅里叶级数与边值问题》，第5版，第756页。培生，???（2013）[24] Ramos, N.、Mittermeier, C.、Kiendl, J.：熔融长丝制造3D打印试样传热的实验与数值研究。《国际先进制造技术杂志》118(5-6)，1367–1381（2022）。https://doi.org/10.1007/ S00170-021-07760-6/FIGURES/18[25] Pietrak, K.、Wi´sniewski, T.S.：复合材料有效热导率模型综述。《电力技术杂志》95(1)，14–24（2015）[26] Vanaei, H.R.、Shirinbayan, M.、Costa, S.F.、Duarte, F.M.、Covas, J.A.、Deligant, M.、Khelladi, S.、Tcharkhtchi, A.：聚乳酸在熔融长丝制造过程中的热行为实验研究。《应用高分子科学杂志》138(4)（2021）。https://doi.org/10.1002/APP.49747

**作者贡献**：概念化：Nathalie Ramos 和 Josef Kiendl，方法论：Nathalie Ramos 和 Christoph Mittermeier，验证：Nathalie Ramos，撰写——初稿：Nathalie Ramos，撰写——审阅与编辑：Josef Kiendl

**资助**：本研究“熔融长丝制造中传热的高效模拟”由 dtec.bw——德国联邦国防军数字化与技术研究中心资助。dtec.bw 由欧盟“下一代欧盟”计划资助。本研究还获得了欧洲研究委员会通过 H2020 ERC 巩固者拨款项目（2019）项目编号 864482 FDM$^2$ 的支持。谨此致谢 AMOS 对项目 3“风险管理与最大限度提高船舶与海洋结构物的可操作性”的支持。

**数据可用性**：本研究中呈现的数据可向通讯作者索取。

**利益冲突**：作者声明不存在利益冲突。