



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115527632 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 27

(21) 申请号 202210964243.1

G06F 113/26 (2020.01)

(22) 申请日 2022.08.11

G06F 119/14 (2020.01)

(71) 申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 袁松梅 高孟玄 周宁 张家齐

危家勇

(74) 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司

公司 11002

专利代理师 赵娜

(51) Int. Cl.

G16C 60/00 (2019.01)

G06F 17/11 (2006.01)

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

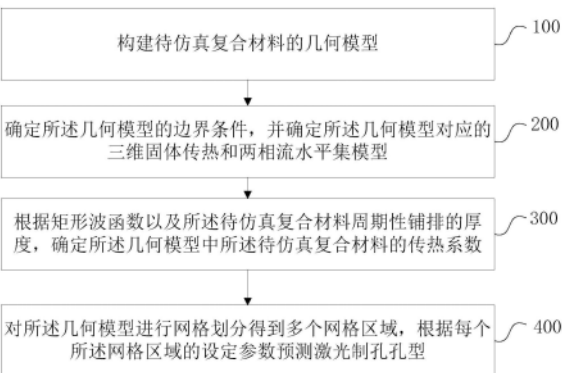
权利要求书3页 说明书16页 附图4页

(54) 发明名称

复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置

(57) 摘要

本发明涉及激光加工技术领域,提供一种复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置,该方法包括:构建待仿真复合材料的几何模型;确定几何模型的边界条件,并确定几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;对几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。本发明利用两相流-水平集的方法耦合流体传热进行流体动力学仿真对激光选区融化过程进行复现,能够在考虑复合材料每层导热系数不同的情况下,预测复合材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动和熔体冷凝后堆积的情况,从而提高激光制孔的效率。



1. 一种复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,包括:

构建待仿真复合材料的几何模型;

确定所述几何模型的边界条件,并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

2. 根据权利要求1所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,所述根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数,包括:

根据所述待仿真复合材料的径向传热系数、轴向传热系数以及单层厚度,确定所述矩形波函数;

对所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度和所述待仿真复合材料对应的坐标信息进行取模;

根据取模结果以及所述矩形波函数确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数。

3. 根据权利要求1所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,所述对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型,包括:

确定所述几何模型的网格划分参数;

根据所述网格划分参数对所述几何模型进行网格划分得到多个所述网格区域;

根据每个所述网格区域的温度、速度、压力和相成分预测激光制孔孔型。

4. 根据权利要求1所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,所述确定所述几何模型的边界条件,包括:

确定所述几何模型的初始条件、边界热源条件和两相流水平集边界条件。

5. 根据权利要求1所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,所述确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型,包括:

确定流体的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程;

根据所述质量守恒方程、所述动量守恒方程、所述能量守恒方程以及所述水平集方程,确定所述三维固体传热和两相流水平集模型。

6. 根据权利要求5所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,确定所述质量守恒方程,包括:

根据流体速度、第一设定函数、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度以及液态金属的密度,确定所述质量守恒方程。

7. 根据权利要求5所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,确定动量守恒方程,包括:

根据流体速度、体积力、单位阵、地球的重力加速度、表面张力、反冲力、马兰戈尼力、第一设定函数、第二设定函数以及有限元区域中的动态粘度,密度,温度和液体压力,确定所

述动量守恒方程。

8. 根据权利要求5所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,确定能量守恒方程,包括:

根据流体速度、有限元区域中的密度、比热容、温度和导热系数、液体密度、待仿真复合材料对激光的吸收率、蒸发潜热、蒸发前沿的后退速度、传热系数、表面辐射率、玻耳兹曼常数、第一设定函数、面热源以及激光脉冲的作用时间分布,确定所述能量守恒方程。

9. 根据权利要求5所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,确定水平集方程,包括:

根据水平集参数、流体速度、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度、液态金属的密度、蒸汽的体积分数、液体的体积分数、第一设定函数以及第二设定函数,确定所述水平集方程。

10. 根据权利要求5所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法,其特征在于,所述三维固体传热和两相流水平集模型,包括:

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot \vec{u} = \delta \dot{m} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_L} \right) \vec{n}$$

其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\dot{m}$  表示待仿真复合材料气化的质量损失量,  $\rho_v$  表示金属蒸气的密度,  $\rho_L$  表示液态金属的密度,  $\vec{n}$  表示法向向量;

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \\ + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} + \delta \left( \sigma \kappa \nabla \phi \vec{i} - P_{recoil} \vec{i} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j} \right) \end{aligned}$$

其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $p$  表示有限元区域中的液体压力,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\mu$  表示有限元区域中的动态粘度,  $I$  表示单位阵,  $\vec{F}_{vol}$  表示体积力,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\vec{g}$  表示地球的重力加速度,  $\sigma \kappa \nabla \phi \vec{i}$  表示表面张力,  $P_{recoil} \vec{i}$  表示反冲力,  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j}$  表示马兰戈尼力,  $\vec{i}$  和  $\vec{j}$  表示法向向量;

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \\ + \delta [\alpha S g(t) - L_v v_e \rho_l + h(T_0 - T) + \xi k_b (T_0^4 - T^4)] \end{aligned}$$

其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $C_p$  表示有限元区域中的比热容,  $k$  表示有限元区域中的导热系数,  $T_0$  表示有限元区域中的初始温度,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\alpha$  表示待仿真复合材料对激光的吸收率,  $L_v$  表示蒸发潜热,  $v_e$  表示蒸发前沿的后退速度,  $\rho_l$  表示液体密度,  $h$  表示传热系数,  $\xi$  表示表面辐射率,  $k_b$  表示玻耳兹曼常数,  $S$  表示面热源,  $g(t)$  表示激光脉冲的作用时间分布,  $\delta$  表示第一设定函数;

水平集方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi - \delta \dot{m} \left( \frac{V_{f,v}}{\rho_v} + \frac{V_{f,L}}{\rho_L} \right) + \gamma \nabla \cdot \left( \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon \nabla \phi \right) = 0$$

其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\dot{m}$  表示待仿真复合材料气化的质量损失量,  $\varepsilon$  和  $\gamma$  表示水平集参数,  $\rho_v$  表示金属蒸气的密度,  $\rho_L$  表示液态金属的密度,  $V_{f,v}$  表示蒸汽的体积分数,  $V_{f,L}$  表示液体的体积分数。

11. 一种激光制孔方法, 其特征在于, 应用于如权利要求1至10中任一项所述的复合材料激光制孔孔型的预测方法, 包括:

确定预测的激光制孔孔型的第一制孔参数;

根据所述第一制孔参数调整第二制孔参数, 并根据调整后的第二制孔参数进行激光制孔。

12. 一种复合材料激光制孔孔型的预测装置, 其特征在于, 包括:

构建模块, 用于构建待仿真复合材料的几何模型;

第一确定模块, 用于确定所述几何模型的边界条件, 并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

第二确定模块, 用于根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度, 确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

预测模块, 用于对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域, 根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

13. 一种激光制孔设备, 包括存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序, 其特征在于, 所述处理器执行所述程序时实现如权利要求1至10任一项所述复合材料激光制孔孔型的预测方法, 或者实现如权利要求11所述的激光制孔方法。

14. 一种非暂态计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 其特征在于, 所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至10任一项所述复合材料激光制孔孔型的预测方法, 或者实现如权利要求11所述的激光制孔方法。

## 复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光加工技术领域,尤其涉及一种复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置。

### 背景技术

[0002] 对于材料的脉冲激光加工,根据其去除过程可以分为以毫秒、微秒激光加工为代表的热加工去除过程与以飞秒、皮秒为代表的非热去除过程,前者也成为长脉冲加工过程,后者被称为短脉冲加工过程。长脉冲加工过程是指利用激光束投射到材料表面产生的热效应来完成加工过程,加工过程中激光通过聚焦获得高能量,达到使固体材料通过融化或蒸发而消除的目的。但是,对于复合材料来说,因为导热系数等热物理参数在沿纤维方向和垂直纤维方向的取值不一样,所以针对复合材料的激光打孔有限元数值仿真比较少且较为简单。

[0003] 目前,有大量与激光钻孔相关的一维模型,由于这类模型不适用于强沸腾和熔体喷射等复杂情况,无法预测熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况,也无法进行烧蚀表面的追踪,更无法查看在不同激光参数下小孔形成的几何形状区别,因此,现有的模型无法预测复合材料激光制孔孔型。

### 发明内容

[0004] 本发明提供一种复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置,用以解决预测复合材料激光制孔孔型的问题,通过利用两相流-水平集的方法耦合流体传热进行流体动力学仿真对激光选区融化过程进行了复现,能够在考虑复合材料每层导热系数不同的情况下,预测复合材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况,从而提高激光制孔的效率。

[0005] 本发明提供一种复合材料激光制孔孔型的预测方法,包括:

[0006] 构建待仿真复合材料的几何模型;

[0007] 确定所述几何模型的边界条件,并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0008] 根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0009] 对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

[0010] 在一个实施例中,所述根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数,包括:

[0011] 根据所述待仿真复合材料的径向传热系数、轴向传热系数以及单层厚度,确定所述矩形波函数;

[0012] 对所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度和所述待仿真复合材料对应的坐标信

息进行取模；

[0013] 根据取模结果以及所述矩形波函数确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数。

[0014] 在一个实施例中，所述对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域，根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型，包括：

[0015] 确定所述几何模型的网格划分参数；

[0016] 根据所述网格划分参数对所述几何模型进行网格划分得到多个所述网格区域；

[0017] 根据每个所述网格区域的温度、速度、压力和相成分预测激光制孔孔型。

[0018] 在一个实施例中，所述确定所述几何模型的边界条件，包括：

[0019] 确定所述几何模型的初始条件、边界热源条件和两相流水平集边界条件。

[0020] 在一个实施例中，所述确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型，包括：

[0021] 确定流体的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程；

[0022] 根据所述质量守恒方程、所述动量守恒方程、所述能量守恒方程以及所述水平集方程，确定所述三维固体传热和两相流水平集模型。

[0023] 在一个实施例中，确定所述质量守恒方程，包括：

[0024] 根据流体速度、第一设定函数、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度以及液态金属的密度，确定所述质量守恒方程。

[0025] 在一个实施例中，确定动量守恒方程，包括：

[0026] 根据流体速度、体积力、单位阵、地球的重力加速度、表面张力、反冲力、马兰戈尼力、第一设定函数、第二设定函数以及有限元区域中的动态粘度，密度，温度和液体压力，确定所述动量守恒方程。

[0027] 在一个实施例中，确定能量守恒方程，包括：

[0028] 根据流体速度、有限元区域中的密度，比热容，温度和导热系数、液体密度、待仿真复合材料对激光的吸收率、蒸发潜热、蒸发前沿的后退速度、传热系数、表面辐射率、玻耳兹曼常数、第一设定函数、面热源以及激光脉冲的作用时间分布，确定所述能量守恒方程。

[0029] 在一个实施例中，确定水平集方程，包括：

[0030] 根据水平集参数、流体速度、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度、液态金属的密度、蒸汽的体积分数、液体的体积分数、第一设定函数以及第二设定函数，确定所述水平集方程。

[0031] 在一个实施例中，所述三维固体传热和两相流水平集模型，包括：

[0032] 质量守恒方程：

$$[0033] \quad \nabla \cdot \vec{u} = \delta \dot{m} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_L} \right) \vec{n}$$

[0034] 其中， $\nabla$ 表示梯度算子， $\vec{u}$ 表示流体速度， $\delta$ 表示第一设定函数， $\dot{m}$ 表示待仿真复合材料气化的质量损失量， $\rho_v$ 表示金属蒸气的密度， $\rho_L$ 表示液态金属的密度， $\vec{n}$ 表示法向向量；

[0035] 动量守恒方程：

$$\begin{aligned}
 [0036] \quad & \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \\
 & + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} + \delta \left( \sigma \kappa \nabla \phi \vec{i} - P_{recoil} \vec{i} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j} \right)
 \end{aligned}$$

[0037] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $p$  表示有限元区域中的液体压力,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\mu$  表示有限元区域中的动态粘度,  $I$  表示单位阵,  $\vec{F}_{vol}$  表示体积力,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\vec{g}$  表示地球的重力加速度,  $\sigma \kappa \nabla \phi \vec{i}$  表示表面张力,  $P_{recoil} \vec{i}$  表示反冲力,  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j}$  表示马兰戈尼力,  $\vec{i}$  和  $\vec{j}$  表示法向量;

[0038] 能量守恒方程:

$$\begin{aligned}
 [0039] \quad & \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \\
 & + \delta \left[ \alpha S g(t) - L_v v_e \rho_l + h(T_0 - T) + \xi k_b (T_0^4 - T^4) \right]
 \end{aligned}$$

[0040] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $C_p$  表示有限元区域中的比热容,  $k$  表示有限元区域中的导热系数,  $T_0$  表示有限元区域中的初始温度,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\alpha$  表示待仿真复合材料对激光的吸收率,  $L_v$  表示蒸发潜热,  $v_e$  表示蒸发前沿的后退速度,  $\rho_l$  表示液体密度,  $h$  表示传热系数,  $\xi$  表示表面辐射率,  $k_b$  表示玻耳兹曼常数,  $S$  表示面热源,  $g(t)$  表示激光脉冲的作用时间分布,  $\delta$  表示第一设定函数;

[0041] 水平集方程:

$$\begin{aligned}
 [0042] \quad & \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi - \delta \dot{m} \left( \frac{V_{f,v}}{\rho_v} + \frac{V_{f,L}}{\rho_L} \right) \\
 & + \gamma \nabla \cdot \left( \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon \nabla \phi \right) = 0
 \end{aligned}$$

[0043] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\dot{m}$  表示待仿真复合材料气化的质量损失量,  $\varepsilon$  和  $\gamma$  表示水平集参数,  $\rho_v$  表示金属蒸气的密度,  $\rho_L$  表示液态金属的密度,  $V_{f,v}$  表示蒸汽的体积分数,  $V_{f,L}$  表示液体的体积分数。

[0044] 本发明还提供一种激光制孔方法, 包括:

[0045] 确定预测的激光制孔孔型的第一制孔参数;

[0046] 根据所述第一制孔参数调整第二制孔参数, 并根据调整后的第二制孔参数进行激光制孔。

[0047] 本发明还提供一种复合材料激光制孔孔型的预测装置, 包括:

[0048] 构建模块, 用于构建待仿真复合材料的几何模型;

[0049] 第一确定模块, 用于确定所述几何模型的边界条件, 并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0050] 第二确定模块, 用于根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度, 确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0051] 预测模块, 用于对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域, 根据每个所述

网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

[0052] 本发明还提供一种激光制孔设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现如上述任一种所述复合材料激光制孔孔型的预测方法,或者实现如上述所述激光制孔方法。

[0053] 本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现如上述任一种所述复合材料激光制孔孔型的预测方法,或者实现如上述所述激光制孔方法。

[0054] 本发明提供的复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置,通过构建待仿真复合材料的几何模型;确定几何模型的边界条件,并确定几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;根据矩形波函数以及待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数;对几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。本发明实施例利用两相流-水平集的方法耦合流体传热进行流体动力学仿真对激光选区融化过程进行了复现,能够在考虑复合材料每层导热系数不同的情况下,预测复合材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况,从而提高激光制孔的效率。

## 附图说明

[0055] 为了更清楚地说明本发明或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0056] 图1是本发明提供的复合材料激光制孔孔型的预测方法的流程示意图;

[0057] 图2是本发明提供的待仿真复合材料的几何模型示意图;

[0058] 图3是本发明提供的网格区域的示意图;

[0059] 图4是本发明提供的矩形波函数的示意图;

[0060] 图5是本发明提供的仿真激光制孔的示意图;

[0061] 图6是本发明提供的复合材料激光制孔孔型的预测装置的结构示意图;

[0062] 图7是本发明提供的激光制孔设备的结构示意图。

## 具体实施方式

[0063] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0064] 下面结合图1-图7描述本发明的复合材料激光制孔孔型的预测方法和装置。

[0065] 具体地,本发明提供了一种复合材料激光制孔孔型的预测方法,参照图1,图1是本发明提供的复合材料激光制孔孔型的预测方法的流程示意图。

[0066] 本发明实施例提供的复合材料激光制孔孔型的预测方法,包括:

[0067] 步骤100,构建待仿真复合材料的几何模型;



[0068] 需要说明的是,本发明通过COMSOL软件中的两相流-水平集方法模拟材料受热熔化、升华的整个过程,基于此,模拟计算激光制孔过程中小孔的生成过程。

[0069] 具体地,针对如何构建待仿真复合材料的几何模型,可参考图2,在COMSOL中建立待仿真复合材料的几何模型,即材料域模型,如固态区域尺寸为:1mm(宽度)\*0.8mm(高度),气态区域为:1mm(宽度)\*0.2mm(高度),两区域的公用边为两相流交界面。

[0070] 可以理解的是,还需要确定仿真过程中的材料参数、激光参数与环境参数。

[0071] 其中,材料参数主要包括:待仿真复合材料的融化潜热、气化潜热中的一个或多个;还可以包括待仿真复合材料的固态密度、导热系数、比热容以及待仿真复合材料的液态密度、导热系数、比热容;还可以包括待仿真复合材料的相变温度、激光吸收系数、对环境对流换热系数以及对环境的辐射发射率。

[0072] 待仿真复合材料的固体区动态粘度、液体区动态粘度以及表面张力系数、表面张力对温度的导数。

[0073] 激光参数主要包括:激光功率、激光焦点半径、激光作用时间、作用频率中的一个或多个。

[0074] 环境参数主要包括:环境温度、环境压力中的至少一个。

[0075] 步骤200,确定所述几何模型的边界条件,并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0076] 在构建待仿真复合材料的几何模型后,还需要确定待仿真复合材料的几何模型的边界条件,包括初始条件、边界热源条件和两相流水平集边界条件等。同时,需要确定几何模型所对应的三维固体传热和两相流水平集模型。

[0077] 步骤300,根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0078] 需要说明的是,对于复合材料来说,需要考虑复合材料的轴向导热系数和径向导热系数,以及因为复合材料各向异性性质带来不同的热物理系数(如热膨胀系数等)。

[0079] 根据矩形波函数以及待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数,例如,通过复合函数的形式,根据几何模型中材料不同的高度,赋不同的复合材料导热系数值,模拟不同的复合材料层导热系数不一致的情形。

[0080] 步骤400,对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型;

[0081] 对几何模型进行网格划分得到多个网格区域,可参考图3,由图3可知,每个网格区域的大小可以相同,也可以不同。然后,根据每个网格区域的设定参数预测激光制孔孔型,其中,该设定参数主要包括温度、速度、压力和相成分。例如,根据每个节点的温度、速度、压力和相成分预测熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况,以及进行烧蚀表面的追踪,并查看在不同激光参数下小孔形成的几何形状区别,基于此,可以预测激光制孔孔型,如以温度为例,在结果节点下建立三维查看节点,输入表达式即可得到温度的变化结果;以速度为例,结果节点下建立三维查看节点,输入表达式即可得到速度的变化结果。

[0082] 本发明实施例提供一种复合材料激光制孔孔型的预测方法,通过在COMSOL中设定周期性函数的方式赋予了有限元区域在不同层具有不同的导热系数,避免了无法跨层进行有限元变形,同时,通过两相流-水平集的方法实现了复合材料的激光打孔过程仿真,模型

可以预测复合材料被激光辐照加工后熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况,还可以进行烧蚀表面的追踪,以及查看在不同激光参数下小孔形成的几何形状区别,从而提高激光制孔的效率。

[0083] 在一个实施例中,根据矩形波函数以及待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数,具体包括:根据待仿真复合材料的径向传热系数、轴向传热系数以及单层厚度,确定矩形波函数;对待仿真复合材料周期性铺排的厚度和待仿真复合材料对应的坐标信息进行取模;根据取模结果以及矩形波函数确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数。例如,首先,在COMSOL中建立一个矩形波,其上限为1,下限为 $k_{sr}/k_{sa}$ ,脉宽为待仿真复合材料单层厚度 $t_f$ ,其中, $k_{sr}$ 表示待仿真复合材料的径向传热系数, $k_{sa}$ 表示待仿真复合材料的轴向传热系数。一般对于复合材料纤维来说,轴向传热系数比较大,假设 $k_{sr}/k_{sa}=1/2$ , $t_f=0.2\text{mm}$ ,可以得到如图4所示的矩形波函数。

[0084] 其次,采用COMSOL中的mod函数对 $(y, t_{fp})$ 取模,其中, $y$ 表示待仿真复合材料的纵向坐标, $t_{fp}$ 表示待仿真复合材料周期性铺排的厚度,如厚度为0.2mm的复合材料为(0/90)循环铺排则周期性铺排的厚度为0.4mm,其中, $t_{fp}/t_f$ 表示周期性铺排的复合材料层数。

[0085] 最后,将取模结果输入到矩形波函数中,并与待仿真复合材料的轴向传热系数 $k_{sa}$ 相乘,可以得到随待仿真复合材料厚度进行变化的待仿真复合材料的传热系数,具体表达式如下所示:

$$[0086] \quad k_l = k_{sa} * \text{rect}(\text{mod}(y, t_{fp})) \quad (1)$$

[0087] 在式(1)中, $k_l$ 表示待仿真复合材料的传热系数, $k_{sa}$ 表示待仿真复合材料的轴向传热系数, $y$ 表示待仿真复合材料的纵向坐标, $t_{fp}$ 表示待仿真复合材料周期性铺排的厚度。

[0088] 本发明实施例根据取模结果以及矩形波函数确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数,提高了确定传热系数的准确性,进一步提高预测复合材料激光制孔孔型的准确性。

[0089] 在一个实施例中,对几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个网格区域的设定参数预测激光制孔孔型,具体包括:确定几何模型的网格划分参数,然后根据网格划分参数对几何模型进行网格划分得到多个网格区域,并确定每个网格区域的温度、速度、压力和相成分,最后根据每个网格区域的温度、速度、压力和相成分预测激光制孔孔型。例如,通过软件用自由四面体自动根据物理场进行网格的划分,其中,划分结构主要含有多个网格单元,多个边界单元,以及多个边单元中的至少一个。

[0090] 其中,确定网格区域的速度的方式如下:

[0091] 高斯分布热源作用在不透明材料上时,可以将其等效为面热源,其简化后的表达式为:

$$[0092] \quad S = \frac{2S_0}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-2x^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

[0093] 在式(2)中, $S_0$ 为激光峰值功率, $r_0$ 为激光光斑半径, $x$ 为有限元域横向坐标,激光脉冲的作用时间分布表示如下:

$$[0094] \quad g(t) = \begin{cases} 1, & t \leq t_p \\ 0, & t > t_p \end{cases} \quad (3)$$

[0095] 在式(3)中,  $t_p$  是脉冲持续时间, 考虑到蒸发、对流和表面对环境辐射造成的热损失, 得出:

$$[0096] \quad -k\nabla T = \alpha Sg(t) - L_v v_e \rho_l + h(T_0 - T) + \xi k_b (T_0^4 - T^4) \quad (4)$$

[0097] 在式(4)中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $k$  表示有限元区域中的导热系数,  $T_0$  表示有限元区域中的初始温度,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\alpha$  表示待仿真复合材料对激光的吸收率,  $L_v$  表示蒸发潜热,  $v_e$  表示由Hertz-Knudsen公式推导出的液体表面蒸发的蒸汽质量流量中获得的蒸发前沿的后退速度,  $\rho_l$  表示液体密度,  $h$  表示传热系数,  $\xi$  表示表面辐射率,  $k_b$  表示玻耳兹曼常数。

[0098] 其中, 通过式(4)可以确定后退速度  $v_e$ , 基于此, 可以确定每个网格区域的速度。

[0099] 需要说明的是, 有限元区域是指待仿真复合材料的几何模型对应的区域, 如图2所构建的区域。

[0100] 本发明实施例通过确定几何模型的网格划分参数, 然后根据网格划分参数对几何模型进行网格划分得到多个网格区域, 最后根据每个网格区域的温度、速度、压力和相成分预测激光制孔孔型, 基于此, 可以预测不同材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况, 从而提高激光制孔的效率。

[0101] 在一个实施例中, 确定所述几何模型的边界条件, 包括: 确定所述几何模型的初始条件、边界热源条件和两相流水平集边界条件, 其中, 初始条件是指材料域初始温度是0或者20℃(室温); 边界热源条件包括热源、热对流热辐射等; 两相流水平集边界条件包括表面张力、反冲力以及Marangoni力(即马兰戈尼力)。

[0102] 通过确定几何模型的边界条件, 基于该边界条件进行仿真, 提高仿真的准确性。

[0103] 在一个实施例中, 确定流体的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程, 然后根据质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程, 确定三维固体传热和两相流水平集模型。需要说明的是, 本发明实施例中的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程是基于对应的基础方程修改得到的, 其中, 各基础方程如下所示:

[0104] 质量守恒基础方程为:

$$[0105] \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

[0106] 动量守恒基础方程为:

$$[0107] \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} \quad (6)$$

[0108] 能量守恒基础方程为:

$$[0109] \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

[0110] 在式(5)至(7)中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\mu, \rho, C_p, k$  分别是整个有限元区域中的动态粘度、密度、比热容和导热系数的值,  $\vec{F}_{vol}$  表示体积力,  $I$  表示单位阵,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\vec{g}$  表示地球的重力加速度(取9.8N/kg),  $p$  表示有限元区域中的液体压力。

[0111] 其中,对于材料的比热容,定义时需要考虑材料熔化潜热和汽化潜热的等效热容:

$$[0112] \quad C_{p,\text{eff}} = C_p + L_m D_m + L_v D_v \quad (8)$$

[0113] 在式(8)中,有  $D_m = \frac{\exp\left[(T-T_m)^2/(\delta T_m)^2\right]}{\sqrt{\pi}\delta T_m}$ ,  $D_v = \frac{\exp\left[(T-T_v)^2/(\delta T_v)^2\right]}{\sqrt{\pi}\delta T_v}$ , 为两个高斯

函数,其中, $T_m$ 和 $T_v$ 分别表示待仿真复合材料的熔点和沸点, $L_m$ 和 $L_v$ 分别表示待仿真复合材料的熔化潜热和汽化潜热,该式保证了材料的热容是连续的函数,方便在计算中调用。

[0114] 水平集基础方程为:

$$[0115] \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi + \gamma \nabla \cdot \left[ \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon \nabla \phi \right] = 0 \quad (9)$$

[0116] 在式(9)中, $\varepsilon$ 和 $\gamma$ 表示两个水平集参数,分别与水平集界面的厚度和流速有关, $\phi$ 表示第二设定函数,其中,第二设定函数的表达式为 $\phi(x,y,t)$ , $\phi(x,y,t)$ 的取值范围在0到1之间,是用于区分液气相,根据Heaviside方程定义如下:

[0117] 对于材料域,有 $y < -\varepsilon$ :

$$[0118] \quad \phi(x,y,t) = 0 \quad (10)$$

[0119] 对于材料的液体-蒸汽界面域,有 $y = 0$ :

$$[0120] \quad \phi(x,y,t) = 0.5 \quad (11)$$

[0121] 对于蒸汽区域,有 $y > \varepsilon$ :

$$[0122] \quad \phi(x,y,t) = 1 \quad (12)$$

[0123] 可以理解的是,Heaviside方程保证了熔融材料的气化只发生在两相流水平集的两相流边界上,而且在边界过渡区非常平滑。第二设定函数 $\phi(x,y,t)$ 在COMSOL有限元仿真中是自动计算的,第二设定函数 $\phi(x,y,t)$ 的取值范围在0到1之间变化时,边界的物理性质( $\mu, \rho, C_p, k$ )会发生变化,变为以下等效动态粘度、密度、比热容和导热系数:

$$[0124] \quad \rho = \rho_l + (\rho_{\text{air}} - \rho) \phi$$

$$[0125] \quad \mu = \mu_l + (\mu_{\text{air}} - \mu) \phi \quad (13)$$

$$[0126] \quad k = k_l + (k_{\text{air}} - k) \phi$$

$$[0127] \quad C_p = C_{p,\text{eff}} + (C_{p,\text{air}} - C_{p,\text{eff}}) \phi \quad (14)$$

[0128] 该过程可以理解为,在液-气过渡边界上,材料的物理性质( $\mu, \rho, C_p, k$ )会发生变化,逐步由液态的材料物理性质( $\mu, \rho, C_p, k$ )过渡到气化后材料的物理性质( $\mu, \rho, C_p, k$ )。

[0129] 对于两相流边界,定义一个 $\delta$ 函数(即第一设定函数):

$$[0130] \quad \delta = 6 |\phi(1-\phi)| |\nabla \phi| \quad (15)$$

[0131] 在两相流边界上,该函数有取值,其他区域取值为0,所以在控制方程中乘以 $\delta$ 函数可以保证对应的源项只加载到固液交界面上。该函数也是COMSOL软件在计算两相流场时软件内自动计算的,是流体相界面的 $\delta$ 函数。

[0132] 在材料从液相转变为气相的过程中,材料会产生质量损失,所以需要修改对应的NS方程中的质量守恒基础方程和动量守恒基础方程,其中,质量损失项可以表示为:

$$[0133] \quad \dot{m} = (1-\beta) \sqrt{\frac{m}{2\pi k_b T}} P_0 \exp\left[\frac{L_v}{k_b} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (16)$$

[0134] 在式(16)中, $m$ 表示金属工件材料的原子质量, $k_b$ 表示玻尔兹曼常数, $\beta$ 表示凝结系数(蒸汽分子返回到液态区域和液体分子复合系数), $T_v$ 表示蒸发温度, $L_v$ 表示蒸发潜热, $P_0$ 表示一个标准大气压, $T$ 表示有限元区域中的当前温度。

[0135] 当表面温度超过沸点时,材料会发生汽化并伴有质量损失,因此,应在等式中添加两个源项,(5)和(9)方程在界面上分别乘以delta函数。

[0136] 质量守恒方程为:

$$[0137] \quad \nabla \cdot \vec{u} = \delta \dot{m} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_L} \right) \vec{n} \quad (17)$$

[0138] 在式(17)中, $\nabla$ 表示梯度算子, $\vec{u}$ 表示流体速度, $\delta$ 表示第一设定函数, $\dot{m}$ 表示待仿真复合材料气化的质量损失量, $\rho_v$ 表示金属蒸气的密度, $\rho_L$ 表示液态金属的密度, $\vec{n}$ 表示法向向量。

[0139] 水平集方程为:

$$[0140] \quad \begin{aligned} & \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi - \delta \dot{m} \left( \frac{V_{f,v}}{\rho_v} + \frac{V_{f,L}}{\rho_L} \right) \\ & + \gamma \nabla \cdot \left( \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon \nabla \phi \right) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

[0141] 在式(18)中, $\nabla$ 表示梯度算子, $\vec{u}$ 表示流体速度, $\delta$ 表示第一设定函数, $\phi$ 表示第二设定函数, $\dot{m}$ 表示待仿真复合材料气化的质量损失量, $\varepsilon$ 和 $\gamma$ 表示水平集参数, $\rho_v$ 表示金属蒸气的密度, $\rho_L$ 表示液态金属的密度, $V_{f,v}$ 表示蒸汽的体积分数, $V_{f,L}$ 表示液体的体积分数。

[0142] 根据能量守恒基础方程和加工过程中蒸发、对流和表面对环境辐射造成的热损失,结合公式(4)和(7),得到能量守恒方程:

$$[0143] \quad \begin{aligned} & \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \\ & + \delta \left[ \alpha S g(t) - L_v v_e \rho_l + h(T_0 - T) + \xi k_b (T_0^4 - T^4) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

[0144] 在式(19)中, $\nabla$ 表示梯度算子, $\vec{u}$ 表示流体速度, $\rho$ 表示有限元区域中的密度, $C_p$ 表示有限元区域中的比热容, $k$ 表示有限元区域中的导热系数, $T_0$ 表示有限元区域中的初始温度, $T$ 表示有限元区域中的当前温度, $\alpha$ 表示待仿真复合材料对激光的吸收率, $L_v$ 表示蒸发潜热, $v_e$ 表示蒸发前沿的后退速度, $\rho_l$ 表示液体密度, $h$ 表示传热系数, $\xi$ 表示表面辐射率, $k_b$ 表示玻耳兹曼常数, $S$ 表示面热源, $g(t)$ 表示激光脉冲的作用时间分布, $\delta$ 表示第一设定函数。

[0145] 考虑到熔体的反冲压力、Marangoni力以及表面张力,两相流边界可以表示为:

$$[0146] \quad \begin{aligned} & \left[ -pI + \mu(\nabla \vec{u}) + (\nabla \vec{u})^T \right] \vec{n} = \vec{F} \\ & = \sigma \kappa \nabla \phi \vec{i} - P_{\text{recoil}} \vec{i} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j} \end{aligned} \quad (20)$$

[0147] 在式(20)中,右边三项分别是流体的表面张力、反冲力与Marangoni力的表达式,其中,蒸汽反冲压力约为 $\frac{(1+\beta_r)}{2}$ 个蒸发面处蒸汽的饱和压力, $\beta_r$ 表示蒸发面处蒸汽的饱和压力扩散系数,由克劳修斯-克莱伯龙Clausius-Clayperon关系式可以得出反冲力:

$$[0148] \quad P_{recoil} = \frac{(1+\beta_r)}{2} P_{sat}(T) = \frac{(1+\beta_r)}{2} \exp \left[ \frac{L_v}{k_b} \left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (21)$$

[0149] Marangoni力是由沿径向的表面张力梯度引起的,将这三个力作为体积力应用于流体控制方程,将方程(6)改写为动量守恒方程:

$$[0150] \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} + \delta \left( \sigma \kappa \nabla \phi \vec{i} - P_{recoil} \vec{i} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j} \right) \quad (22)$$

[0151] 在式(22)中, $\nabla$ 表示梯度算子, $\vec{u}$ 表示流体速度, $\rho$ 表示有限元区域中的密度, $p$ 表示有限元区域中的液体压力, $T$ 表示有限元区域中的当前温度, $\mu$ 表示有限元区域中的动态粘度, $I$ 表示单位阵, $\vec{F}_{vol}$ 表示体积力, $\delta$ 表示第一设定函数, $\phi$ 表示第二设定函数, $\vec{g}$ 表示地球的重力加速度, $\sigma \kappa \nabla \phi \vec{i}$ 表示表面张力, $P_{recoil} \vec{i}$ 表示反冲力, $\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j}$ 表示马兰戈尼力, $\vec{i}$ 和 $\vec{j}$ 表示法向向量。

[0152] 最后结合公式(17)(18)(19)(22),即可得到三维固体传热和两相流水平集模型,然后基于Comsol Multiphysics的多物理场仿真技术,该模型可以在Comsol Multiphysics中进行实现,该模型可以仿真均质材料激光打孔中小孔的生成过程,并且有坚实的理论依据。

[0153] 例如,在COMSOL中计算上述仿真,首先需要给出材料的具体参数,以 $\text{SiO}_2$ 为例子给出仿真需要的参数表,参考表1:

[0154] 表1

Property	Symbol	Value
固体密度	$\rho_s$	2650 kg/m <sup>3</sup>
液体密度	$\rho_l$	2350 kg/m <sup>3</sup>
固体导热系数	$k_s$	1.67W/m K
液体导热系数	$k_l$	2.87W/m K
固体比热(热容)	$c_s$	863 J/kg K
液体比热(热容)	$c_l$	1150 J/kg K
熔化潜热	$L_m$	$1.23 \cdot 10^5 \text{J/kg}$

[0156]	Property	Symbol	Value
	蒸发潜热	$L_v$	$1.14 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$
	熔化温度	$T_m$	$1710^\circ\text{C}(1983\text{K})$
	蒸发温度	$T_v$	$2230^\circ\text{C}(2503\text{K})$
	激光吸收系数	$\alpha$	0.8
	辐射发射率	$\varepsilon$	0.8
	熔融 $\text{SiO}_2$ 表面张力系数	$\sigma_0$	$0.38\text{N/m}^2$
	对流换热系数	$h$	$20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	环境温度	$T_{amb}$	$293.15\text{K}$
	环境大气压力	$P_{amb}$	$101300 \text{ N/m}^2$
	激光功率	$P$	$20\text{W}$
	光斑直径	$r$	$100\mu\text{m}$
	$\text{SiO}_2$ 分子量	$M$	$60\text{g/mol}[1]$

[0157] 根据上述方程 (17) (18) (19) (22) 与物理参数建立COMSOL软件中的有限元计算仿真,在COMSOL中选择流体传热和两相流水平集模块,该模块包括流体质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、水平集方程的基础形式,然后根据上述推导分别在流体质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、水平集方程中添加源项。

[0158] 质量守恒方程和水平集方程中的质量损失项 (17) (18) 需要在节点下添加弱贡献项实现,其中,质量损失量 $\dot{m}$ 在已知有限元区域温度分布的情况下通过式 (16) 进行计算。

[0159] 激光热源的输入是通过在流体传热的节点下添加热源项实现,即能量守恒方程需要在流体传热的节点下添加热源项实现,其表面对环境对流和对环境热辐射均可以在流体传热的节点下使用软件添加。

[0160] 对于动量守恒方程的修改,通过在动量方程节点下添加体积力来实现,流体的Darcy摩擦力、表面张力、反冲力与Marangoni力都是通过添加体积力来实现的。

[0161] 其中,Darcy摩擦力的表达式为:

$$[0162] \quad \vec{F}_{\text{vol}} = \frac{(1-B)^2}{B^3 + \zeta} A_{\text{mush}} \vec{u} \quad (23)$$

[0163] 其中,B表示液体体积分数, $\zeta$ 表示一个防止公式被零除的微少量,可以设置为0.001, $A_{\text{mush}}$ 表示糊状区常数。在固体区该摩擦力大致为 $10^8\text{N}$ ,在熔点处快速降低,在液体区基本为0,Darcy摩擦力主要用于使两相流中代表固体的有限元区域稳定。

[0164] 表面张力的表达式为 $\sigma \kappa \nabla \phi \vec{i}$ ,其中, $\sigma$ 表示液相的表面张力系数,表面曲率 $\kappa = R_v^{-1} + R_l^{-1}$ 是由沿气/液表面法向方向的局部梯度计算得到的。

[0165] 反冲力表达式为式 (21),温度T是变量,并可以通过热力场计算得到,在COMSOL中,

可以将反冲力的作用表达式添加在两相流界面上。

[0166] Marangoni 力的表达式为  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j}$ , 也可以通过乘以  $\delta$  函数的方式添加在两相流界面上。

[0167] 最后仿真结果如图5所示, 可以仿真出复合材料小孔形成的过程, 并且可以看到熔体流动速度场。

[0168] 冷却过程也可以在计算结果中看到, 其中, 冷却过程加工区域产生了熔体材料向小孔底部回流的现象, 与实际实验的对比图也可以发现材料熔化后由于各种作用力进行了熔体流动并且最终冷凝在小孔壁面和底部上, 说明仿真与实际的激光打孔过程较为相似, 可以具体地仿真材料小孔的成型过程。

[0169] 本发明实施例利用两相流-水平集的方法耦合流体传热进行流体动力学仿真对激光选区融化过程进行了复现, 能够在考虑复合材料每层导热系数不同的情况下, 预测复合材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动以及熔体冷凝后堆积的情况, 从而提高激光制孔的效率。

[0170] 在一个实施例中, 提出一种激光制孔方法, 应用于复合材料激光制孔孔型的预测方法, 包括: 确定预测的激光制孔孔型的第一制孔参数, 然后根据第一制孔参数调整第二制孔参数, 并根据调整后的第二制孔参数进行激光制孔。其中, 第一制孔参数是指通过仿真预测得到的制孔参数, 第二制孔参数是指激光制孔设备的制孔参数。通过采用仿真预测的第一制孔参数调整激光制孔设备的第二制孔参数, 可以提高激光制孔的准确性和效率。

[0171] 图6是本发明提供的复合材料激光制孔孔型的预测装置的结构示意图, 参照图6, 本发明的实施例提供了一种复合材料激光制孔孔型的预测装置, 包括构建模块601, 第一确定模块602、第二确定模块603和预测模块604。

[0172] 所述构建模块601, 用于构建待仿真复合材料的几何模型;

[0173] 所述第一确定模块602, 用于确定所述几何模型的边界条件, 并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0174] 所述第二确定模块603, 用于根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度, 确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0175] 所述预测模块604, 用于对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域, 根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

[0176] 本发明实施例提供一种复合材料激光制孔孔型的预测装置, 通过构建待仿真复合材料的几何模型; 确定几何模型的边界条件, 并确定几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型; 根据矩形波函数以及待仿真复合材料周期性铺排的厚度, 确定几何模型中待仿真复合材料的传热系数; 对几何模型进行网格划分得到多个网格区域, 根据每个网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。本发明利用两相流-水平集的方法耦合流体传热进行流体动力学仿真对激光选区融化过程进行复现, 能够在考虑复合材料每层导热系数不同的情况下, 预测复合材料在激光辐照下小孔的形状生成过程、熔体流动和熔体冷凝后堆积的情况, 从而提高激光制孔的效率。

[0177] 在一个实施例中, 所述第二确定模块603具体用于

[0178] 根据所述待仿真复合材料的径向传热系数、轴向传热系数以及单层厚度, 确定所



述矩形波函数；

[0179] 对所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度和所述待仿真复合材料对应的坐标信息进行取模；

[0180] 根据取模结果以及所述矩形波函数确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数。

[0181] 在一个实施例中，所述预测模块603具体用于：

[0182] 确定所述几何模型的网格划分参数；

[0183] 根据所述网格划分参数对所述几何模型进行网格划分得到多个所述网格区域；

[0184] 根据每个所述网格区域的温度、速度、压力和相成分预测激光制孔孔型。

[0185] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0186] 确定所述几何模型的初始条件、边界热源条件和两相流水平集边界条件。

[0187] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0188] 确定流体的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及水平集方程；

[0189] 根据所述质量守恒方程、所述动量守恒方程、所述能量守恒方程以及所述水平集方程，确定所述三维固体传热和两相流水平集模型。

[0190] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0191] 根据流体速度、第一设定函数、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度以及液态金属的密度，确定所述质量守恒方程。

[0192] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0193] 根据流体速度、体积力、单位阵、地球的重力加速度、表面张力、反冲力、马兰戈尼力、第一设定函数、第二设定函数以及有限元区域中的动态粘度，密度，温度和液体压力，确定所述动量守恒方程。

[0194] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0195] 根据流体速度、有限元区域中的密度，比热容，温度和导热系数、液体密度、待仿真复合材料对激光的吸收率、蒸发潜热、蒸发前沿的后退速度、传热系数、表面辐射率、玻耳兹曼常数、第一设定函数、面热源以及激光脉冲的作用时间分布，确定所述能量守恒方程。

[0196] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0197] 根据水平集参数、流体速度、待仿真复合材料气化的质量损失量、金属蒸气的密度、液态金属的密度、蒸汽的体积分数、液体的体积分数、第一设定函数以及第二设定函数，确定所述水平集方程。

[0198] 在一个实施例中，所述第一确定模块602具体用于：

[0199] 质量守恒方程：

$$[0200] \quad \nabla \cdot \vec{u} = \delta \dot{m} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_L} \right) \vec{n}$$

[0201] 其中， $\nabla$ 表示梯度算子， $\vec{u}$ 表示流体速度， $\delta$ 表示第一设定函数， $\dot{m}$ 表示待仿真复合材料气化的质量损失量， $\rho_v$ 表示金属蒸气的密度， $\rho_L$ 表示液态金属的密度， $\vec{n}$ 表示法向向量；

[0202] 动量守恒方程：

$$\begin{aligned}
[0203] \quad & \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \\
& + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} + \delta \left( \sigma \kappa \nabla \phi \vec{i} - P_{recoil} \vec{i} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j} \right)
\end{aligned}$$

[0204] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $p$  表示有限元区域中的液体压力,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\mu$  表示有限元区域中的动态粘度,  $I$  表示单位阵,  $\vec{F}_{vol}$  表示体积力,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\vec{g}$  表示地球的重力加速度,  $\sigma \kappa \nabla \phi \vec{i}$  表示表面张力,  $P_{recoil} \vec{i}$  表示反冲力,  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \vec{j}$  表示马兰戈尼力,  $\vec{i}$  和  $\vec{j}$  表示法向量;

[0205] 能量守恒方程:

$$\begin{aligned}
[0206] \quad & \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \\
& + \delta \left[ \alpha S g(t) - L_v v_e \rho_l + h(T_0 - T) + \xi k_b (T_0^4 - T^4) \right]
\end{aligned}$$

[0207] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\rho$  表示有限元区域中的密度,  $C_p$  表示有限元区域中的比热容,  $k$  表示有限元区域中的导热系数,  $T_0$  表示有限元区域中的初始温度,  $T$  表示有限元区域中的当前温度,  $\alpha$  表示待仿真复合材料对激光的吸收率,  $L_v$  表示蒸发潜热,  $v_e$  表示蒸发前沿的后退速度,  $\rho_l$  表示液体密度,  $h$  表示传热系数,  $\xi$  表示表面辐射率,  $k_b$  表示玻耳兹曼常数,  $S$  表示面热源,  $g(t)$  表示激光脉冲的作用时间分布,  $\delta$  表示第一设定函数;

[0208] 水平集方程:

$$\begin{aligned}
[0209] \quad & \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi - \delta \dot{m} \left( \frac{V_{f,v}}{\rho_v} + \frac{V_{f,L}}{\rho_L} \right) \\
[0210] \quad & + \gamma \nabla \cdot \left( \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon \nabla \phi \right) = 0
\end{aligned}$$

[0211] 其中,  $\nabla$  表示梯度算子,  $\vec{u}$  表示流体速度,  $\delta$  表示第一设定函数,  $\phi$  表示第二设定函数,  $\dot{m}$  表示待仿真复合材料气化的质量损失量,  $\varepsilon$  和  $\gamma$  表示水平集参数,  $\rho_v$  表示金属蒸气的密度,  $\rho_L$  表示液态金属的密度,  $V_{f,v}$  表示蒸汽的体积分数,  $V_{f,L}$  表示液体的体积分数。

[0212] 图7示例了一种激光制孔设备的实体结构示意图,如图7所示,该激光制孔设备可以包括:处理器(processor)710、通信接口(Communications Interface)720、存储器(memory)730和通信总线740,其中,处理器710,通信接口720,存储器730通过通信总线740完成相互间的通信。处理器710可以调用存储器730中的逻辑指令,以执行复合材料激光制孔孔型的预测方法,该方法包括:

[0213] 构建待仿真复合材料的几何模型;

[0214] 确定所述几何模型的边界条件,并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0215] 根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0216] 对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定

参数预测激光制孔孔型。

[0217] 或者,处理器710可以调用存储器730中的逻辑指令,以执行激光制孔方法,该方法包括:

[0218] 确定预测的激光制孔孔型的第一制孔参数;

[0219] 根据所述第一制孔参数调整第二制孔参数,并根据调整后的第二制孔参数进行激光制孔。

[0220] 此外,上述的存储器730中的逻辑指令可以通过软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM, Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM, Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0221] 另一方面,本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现上述各方法提供的复合材料激光制孔孔型的预测方法,该方法包括:

[0222] 构建待仿真复合材料的几何模型;

[0223] 确定所述几何模型的边界条件,并确定所述几何模型对应的三维固体传热和两相流水平集模型;

[0224] 根据矩形波函数以及所述待仿真复合材料周期性铺排的厚度,确定所述几何模型中所述待仿真复合材料的传热系数;

[0225] 对所述几何模型进行网格划分得到多个网格区域,根据每个所述网格区域的设定参数预测激光制孔孔型。

[0226] 或者,该计算机程序被处理器执行时实现上述各方法提供的激光制孔方法,该方法包括:

[0227] 确定预测的激光制孔孔型的第一制孔参数;

[0228] 根据所述第一制孔参数调整第二制孔参数,并根据调整后的第二制孔参数进行激光制孔。

[0229] 以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0230] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行各个实施

例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0231] 最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

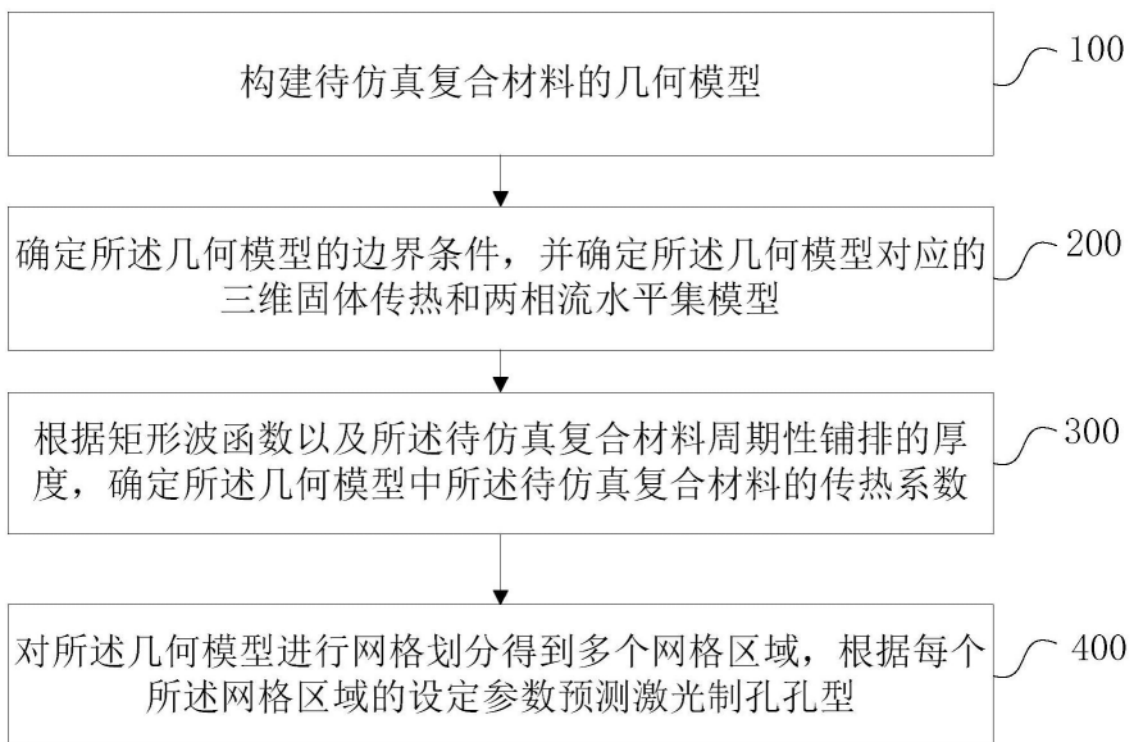


图1

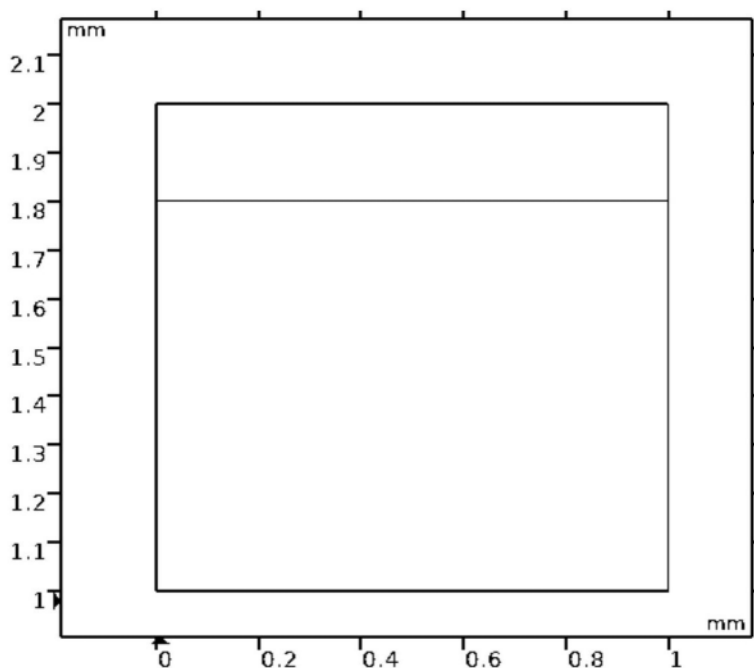


图2

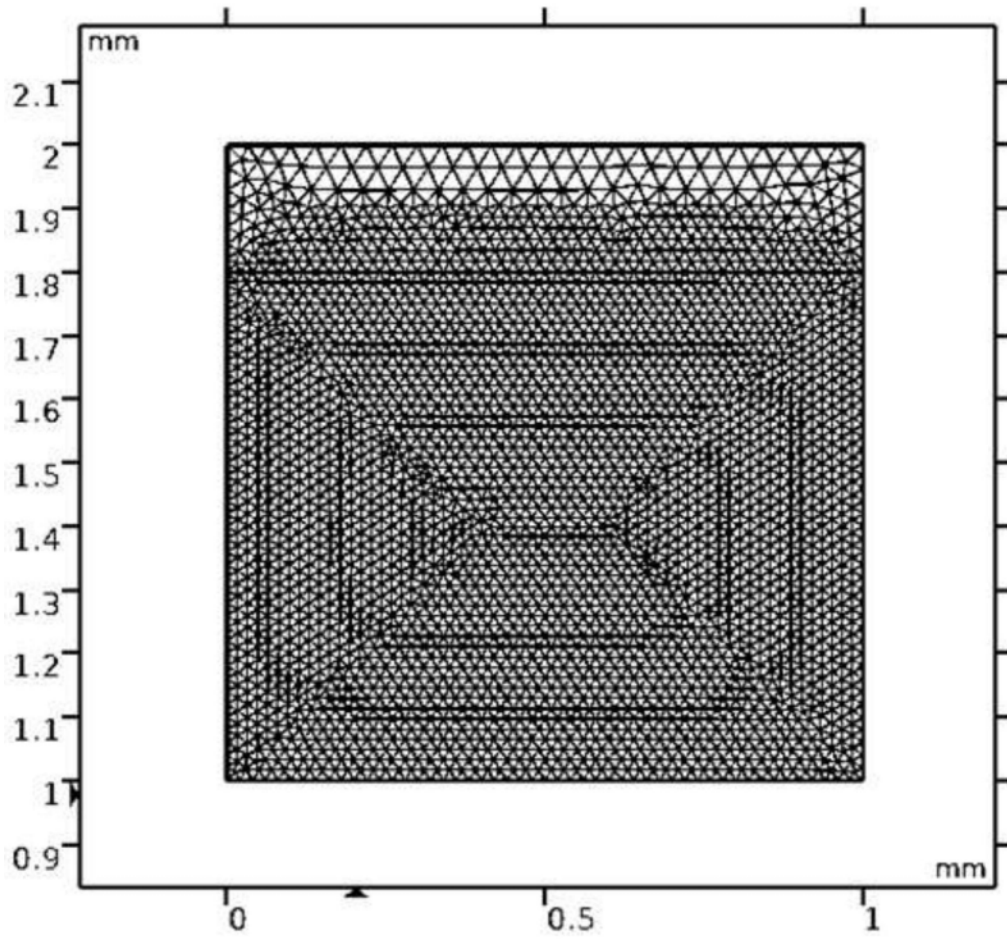


图3

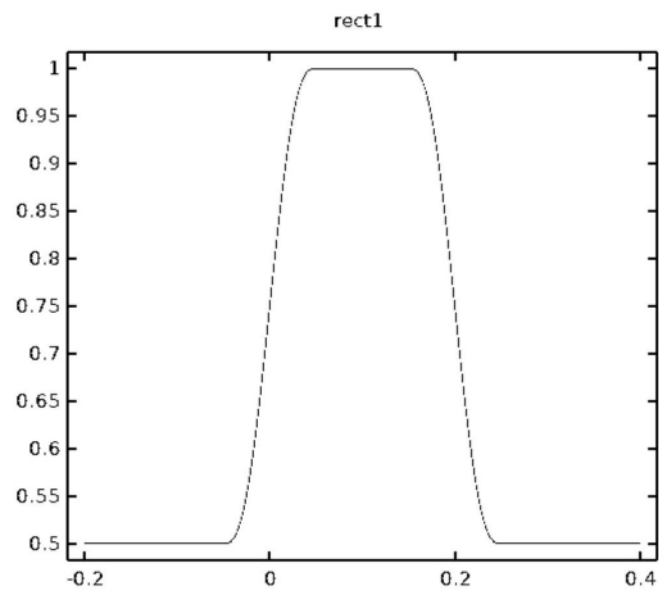


图4

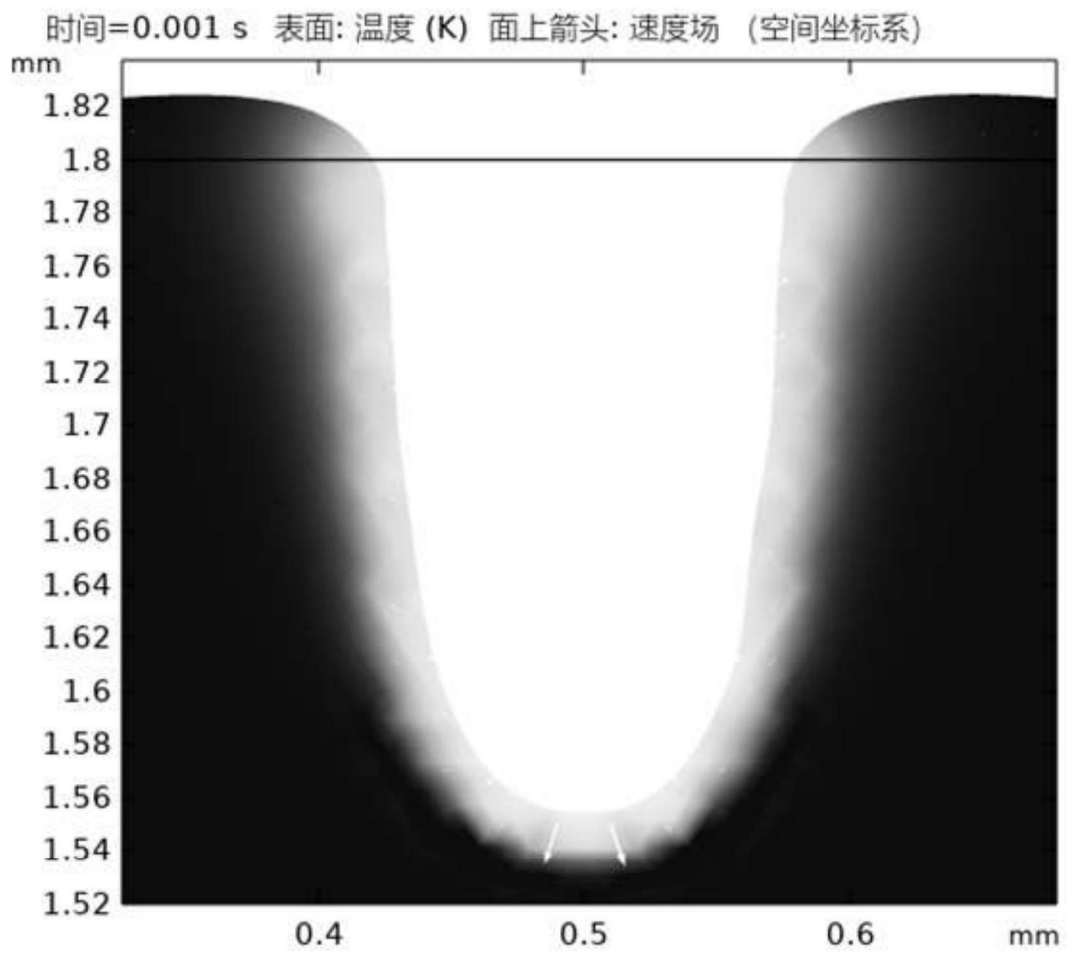


图5

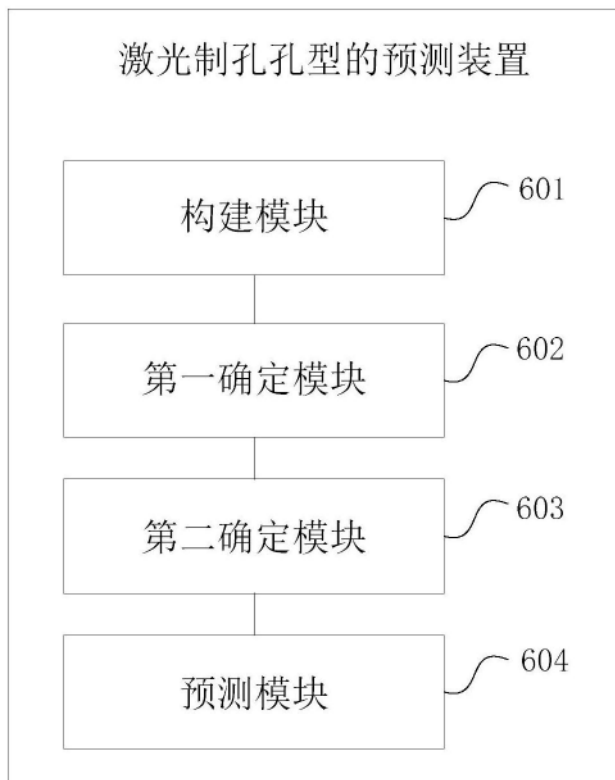


图6

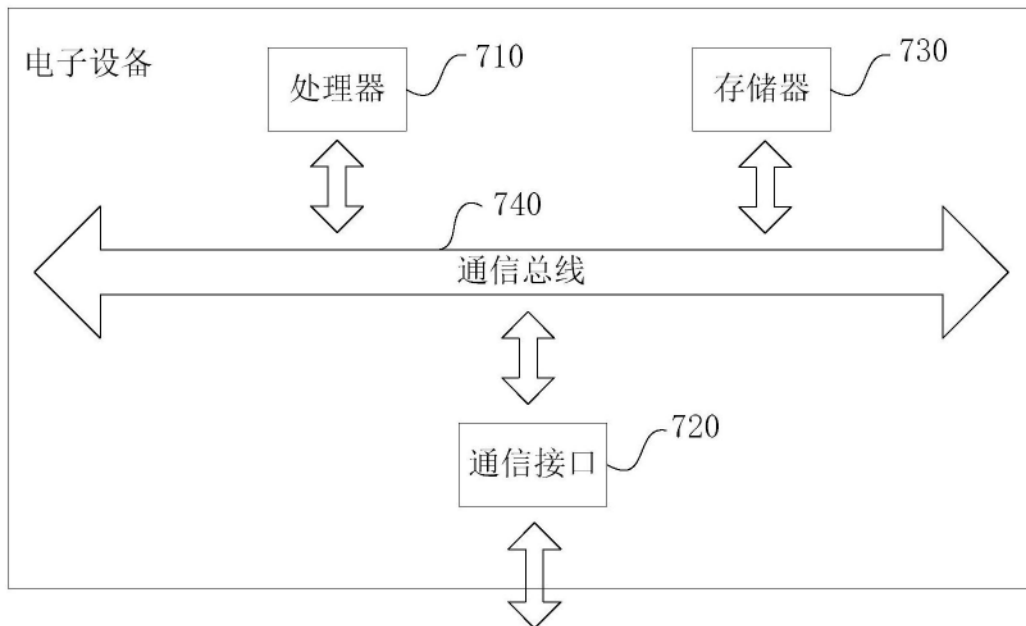


图7