



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110705104 A

(43)申请公布日 2020.01.17

(21)申请号 201910946452.1

(22)申请日 2019.10.05

(71)申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园1号

申请人 国网浙江省电力有限公司

国家电网有限公司

(72)发明人 蒋晓华 黄伟灿 薛芑 陈晓刚

(74)专利代理机构 北京智绘未来专利代理事务  
所(普通合伙) 11689

代理人 肖继军

(51)Int.Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G06F 113/16(2020.01)

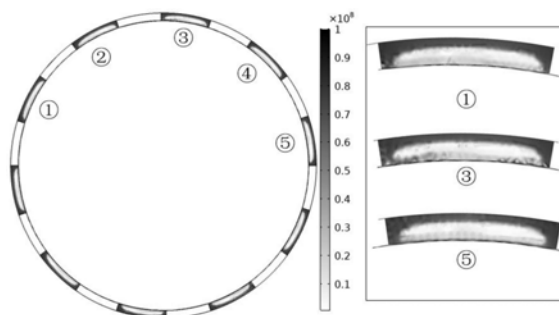
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

### (54)发明名称

一种高温超导导体电流密度分布的仿真分析方法

### (57)摘要

本发明提出了一种考虑超导带材整体利用率的高温超导直流系统电流密度分布的仿真分析方法,首先对高温超导直流电缆导体建立三维模型,并通过求解三维模型得到超导体上的电流分布,优化超导带材螺距来改善带材的整体利用率,使得每根超导带材上电流分布均匀且带材的用量较少。



1. 一种考虑超导带材整体利用率的双极性高温超导直流系统中的超导体电流密度分布的仿真分析方法, 所述双极性高温超导直流系统包括高温超导直流电缆, 所述高温超导直流电缆的超导体呈螺旋形缠绕, 其特征在于, 超导体电流密度分布的仿真分析方法包括如下步骤:

步骤1) 在COMSOL软件中建立高温超导直流电缆的超导带材的三维模型:

建立超导带材和空气域的横截面, 设置一根三维螺旋曲线, 三维螺旋曲线的轴向长度为  $L = P/m$ , 其中  $P$  为超导带材的螺距,  $m$  为超导带材的根数; 将超导带材和空气域的横截面沿着该三维螺旋曲线进行扫掠, 得到三维模型;

步骤2) 设置超导带材的三维模型参数:

2.1) 通过E-J特性设置高温超导导体的电场和电流密度的非线性关系:

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

式(1)中,  $E_c$  为超导材料失去超导态时的场强大小, 取标准值  $1 \times 10^{-4} \text{V/m}$ ;  $J$  为超导带材运行时的电流密度;  $J_c$  为超导带材的临界电流密度,  $n$  表征超导体从超导态向正常态转变的速率的一个拟合值, 取值为10-30;

2.2) 在超导带材横截面外的闭合方形积分路径上通过逐点约束来加载电流:

$$\sum_{i=1}^n H_i L_i = I_0 \quad (2)$$

式(2)中,  $H_i$  为闭合方形积分路径上的磁场强度,  $L_i$  为积分路径长度,  $\sum_{i=1}^n L_i$  构成闭合的方形积分路径; 设置所加电流  $I_0$  为各根超导带材的临界电流之和的一半;

步骤3) 在COMSOL软件中采用瞬态求解器, 通过缓慢加电流的方式来让模型逐渐收敛, 采用的瞬态电流表达式为:

$$I = I_0 \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

式(3)中,  $I_0$  为各根超导带材的临界电流之和的一半,  $\tau$  为设置的激励时长常数, 取值为0.001s,  $t$  为瞬态仿真的总时长,  $0 < t \leq 5\tau$ ;

步骤4) 对每根超导带材上的电流密度分布进行仿真, 得到每根超导带材横截面上的电流密度分布;

步骤5) 计算每根超导带材横截面上电流密度小于  $0.5J_c$  的区域面积  $S$ , 根据该区域面积  $S$  计算面积比  $K = S/S_{\text{total}}$ ,  $S_{\text{total}}$  表示超导带材的横截面面积, 得到所有超导带材中的最大的面积比  $K_{\text{max}}$  和最小的面积比  $K_{\text{min}}$ , 计算超导导体的带材横截面利用率  $\eta_0 = K_{\text{min}}/K_{\text{max}}$ ;

步骤6) 设置超导导体的整体利用率为  $\eta = \cos\theta \cdot \eta_0$ , 其中  $\theta$  为超导带材的缠绕角, 超导带材的缠绕角  $\theta$  是根据  $\theta = \arctan(2\pi r/P)$  计算, 其中  $r$  为超导体内侧的铜支撑管的半径,  $P$  为超导带材的螺距;

步骤7) 计算超导体整体利用率最高时的超导带材螺距。

2. 根据权利要求1所述的仿真分析方法, 其特征在于: 在步骤2) 中, 设置超导带材的三维模型参数还包括边界条件的设定: 在超导带材6倍外径处和两轴的中心面处设置磁绝缘边界, 使得周向边界上的磁场和边界平行, 在轴线上的端面边界施加周期性边界条件, 使得

两个边界上的磁场相等。

3. 一种超导直流电缆, 包括铜支撑管、超导带材和绝缘层, 所述铜支撑管位于所述超导直流电缆的中心, 所述绝缘层设置在超导带材的外周, 其特征在于: 多根所述超导带材螺旋形地缠绕在所述铜支撑管上, 所述超导带材的螺距是通过权利要求1所述的仿真分析方法计算得到的。

4. 根据权利要求3所述的超导直流电缆, 其特征在于: 所述超导带材为Bi2223带材。

5. 根据权利要求3所述的超导直流电缆, 其特征在于: 所述绝缘层为聚丙烯层压绝缘层。

6. 根据权利要求3所述的超导直流电缆, 其特征在于: 所述铜支撑管的半径为13mm。

7. 一种双极性超导直流系统, 包括两个如权利要求3所述的超导直流电缆, 其特征在于: 所述超导直流电缆平行地设置在液体绝缘层中, 所述液体绝缘层的外周设置有液体天然气, 所述液体天然气的外周设置有隔热层。

8. 根据权利要求7所述的双极性超导直流系统, 其特征在于: 所述两个平行设置的超导直流电缆的中心之间的距离为86mm。

9. 根据权利要求7所述的双极性高温超导直流系统, 其特征在于: 所述两个高温超导直流电缆关于中心面对称。

## 一种高温超导导体电流密度分布的仿真分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于超导电缆设计领域,特别涉及一种考虑超导带材利用率的高温超导导体电流密度分布的仿真分析方法。

### 背景技术

[0002] 高温超导电缆能够在较低的传输损耗下实现极大容量的电流传输,是一种在有限空间内实现能量传输的极佳方式。超导直流电缆由于电阻为0,能真正发挥出超导电缆的性能。单独使用超导电缆需要配备相应的冷却设备,这会增加输电系统的复杂性。超导能源管道能够同时传输电能和液化天然气,为高温超导电缆的运行提供了一个比较适合的低温环境,在超导能源管道中同时利用超导电缆传输电能极大提升了能量传输的效率,管道的经济性显著增长。天然气的主要成分是甲烷,其凝固温度在90K左右,而高温超导带材的工作温度至少要在90K以下,通过在液化天然气中添加乙烷、丙烷等天然气次要成分可利用混合物固液平衡特性使其凝固点降低,最低可降至61K左右,故继而可通过制冷技术将液化天然气的温度降至85K-90K左右。而在90K的温度环境下,超导电缆的临界电流密度是77K的一半,所以在液化天然气管道中使用超导电缆时尤其要关心导体上的电流分布,也即超导带材的利用率问题。

[0003] 目前对于超导直流电缆的导体设计还很少,并且没有一个统一的设计准则,大多数超导直流电缆导体设计仍是采用超导交流电缆导体设计的指导原则——通过让电流均匀分布在每层超导带来尽量减少交流损耗。目前双极型超导直流电缆的结构主要是双极同轴型。由于高温超导输电在将来能够极大提升电网输电能力,在城市电网升级中起到重要作用,因此本发明提出一种考虑超导带材整体利用率的高温超导直流系统电流密度分布的仿真分析方法。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提出一种考虑超导带材整体利用率的双极性高温超导直流系统中的超导导体电流密度分布的仿真分析方法。

[0005] 本发明提出了一种双极性高温超导直流系统的超导导体电流密度分布的仿真分析方法,所述双极性高温超导直流系统包括高温超导直流电缆,所述高温超导直流电缆的超导导体呈螺旋形缠绕,其特征在于,超导导体电流密度分布的仿真分析方法包括如下步骤:

[0006] 步骤1) 在COMSOL软件中建立高温超导直流电缆的超导带材的三维模型:

[0007] 建立超导带材和空气域的横截面,设置一条三维螺旋曲线,三维螺旋曲线的轴向长度为 $L=P/m$ ,其中P为超导带材的螺距,m为超导带材的根数;将超导带材和空气域的横截面沿着该三维螺旋曲线进行扫掠,得到三维模型;

[0008] 步骤2) 设置超导带材的三维模型参数:

[0009] 2.1) 通过E-J特性设置高温超导导体的电场和电流密度的非线性关系:

$$[0010] \quad E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

[0011] 式(1)中, $E_c$ 为超导材料失去超导态时的场强大小,取标准值 $1 \times 10^{-4} \text{V/m}$ ;  $J$ 为超导带材运行时的电流密度; $J_c$ 为超导带材的临界电流密度, $n$ 表征超导体从超导态向正常态转变的速率的一个拟合值,取值为10-30;

[0012] 2.2)在超导带材横截面外的闭合方形积分路径上通过逐点约束来加载电流:

$$[0013] \quad \sum_{i=1}^n H_i L_i = I_0 \quad (2)$$

[0014] 式(2)中, $H_i$ 为闭合方形积分路径上的磁场强度, $L_i$ 为积分路径长度, $\sum_{i=1}^n L_i$ 构成闭合的方形积分路径;设置所加电流 $I_0$ 为各根高温超导带材的临界电流之和的一半;

[0015] 步骤3)在COMSOL软件中采用瞬态求解器,通过缓慢加电流的方式来让模型逐渐收敛,采用的瞬态电流表达式为:

$$[0016] \quad I = I_0 \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

[0017] 式(3)中, $I_0$ 为各根超导带材的临界电流之和的一半, $\tau$ 为设置的激励时长常数,取值为0.001s, $t$ 为瞬态仿真的总时长, $0 < t \leq 5\tau$ ;

[0018] 步骤4)对每根超导带材上的电流密度分布进行仿真,得到每根超导带材横截面上的电流密度分布;

[0019] 步骤5)计算每根超导带材横截面上电流密度小于 $0.5J_c$ 的区域面积 $S$ ,根据该区域面积 $S$ 计算面积比 $K = S/S_{\text{total}}$ , $S_{\text{total}}$ 表示单根超导带材的横截面面积,得到所有超导带材中的最大的面积比 $K_{\text{max}}$ 和最小的面积比 $K_{\text{min}}$ ,计算超导导体的带材横截面利用率 $\eta_0 = K_{\text{min}}/K_{\text{max}}$ ;

[0020] 步骤6)设置超导导体的整体利用率为 $\eta = \cos\theta \cdot \eta_0$ ,其中 $\theta$ 为超导带材的缠绕角,超导带材的缠绕角 $\theta$ 是根据 $\theta = \arctan(2\pi r/P)$ 计算,其中 $r$ 为超导导体内侧的铜支撑管的半径, $P$ 为超导带材的螺距;

[0021] 步骤7)计算超导导体整体利用率最高时的超导带材螺距。

[0022] 进一步地,步骤2)的设置超导带材的三维模型参数还包括边界条件的设定:在超导带材6倍外径处和两轴的中心面处设置磁绝缘边界,使得周向边界上的磁场和边界平行,在轴线上的端面边界施加周期性边界条件,使得两个边界上的磁场相等。

[0023] 本发明还涉及一种高温超导直流电缆,包括铜支撑管、超导带材和绝缘层,所述铜支撑管位于所述超导直流电缆的中心,所述绝缘层设置在超导带材的外周,其特征在于:多根所述超导带材螺旋形地缠绕在所述铜支撑管上,所述超导带材的螺距是通过上述仿真分析方法计算得到的。

[0024] 所述超导带材的螺距为151-460mm。

[0025] 进一步地,所述超导带材为Bi2223带材。

[0026] 进一步地,所述绝缘层为聚丙烯层压绝缘层。

[0027] 本发明还涉及一种双极性超导直流系统,包括两个所述超导直流电缆,其特征在于:所述超导直流电缆平行地设置在液体绝缘层中,所述液体绝缘层的外周设置有液体天然气,所述液体天然气的外周设置有隔热层。

[0028] 所述两个平行设置的超导直流电缆的中心之间的距离为86mm。

[0029] 所述铜支撑管的半径为13mm。

[0030] 本发明的特点及有益效果在于：

[0031] 本发明提出一种考虑超导带材整体利用率的高温超导体电流密度分布的仿真分析方法。该方法考虑双极性高温超导电缆上的电流在稳态时的电流分布，通过三维螺旋模型仿真和分析了螺旋分布的超导带材上电流密度的均匀度，通过优化超导带的螺距来使得每根超导带上电流分布均匀且带材的用量较少。

## 附图说明

[0032] 图1为双极性超导直流系统的示意图；

[0033] 图2为双极性超导直流系统中的超导直流电缆的超导带材的结构形式图；

[0034] 图3为图2的(a)直线型超导带材的两维模型；

[0035] 图4为图2的(b)螺旋型超导带材的三维模型；

[0036] 图5为螺旋型超导电缆的电流分布图。

## 具体实施方式

[0037] 下面结合说明书附图以及具体实施例对本发明的技术方案做进一步详细介绍。

[0038] 如图1所示，一种双极性高温超导直流系统，包括两个高温超导直流电缆1，所述高温超导直流电缆1平行地设置在液体绝缘层7中，所述液体绝缘层7的外周设置有液体天然气5，所述液体天然气5的外周设置有隔热层6。

[0039] 所述两个平行设置的高温超导直流电缆1的中心之间的距离为86mm。

[0040] 两个高温超导直流电缆1关于中心面8对称。

[0041] 高温超导直流电缆1，包括铜支撑管4、超导带材2和绝缘层3，所述铜支撑管4位于所述高温超导直流电缆1的中心，所述绝缘层3设置在超导带材2的外周，多根所述超导带材设置在所述铜支撑管上。

[0042] 所述超导带材2为Bi2223带材。

[0043] 所述绝缘层3为聚丙烯层压绝缘层。

[0044] 所述铜支撑管4的半径为13mm。

[0045] 如图2所示，超导带材设置在所述铜支撑管上的形式可以为直线型或螺旋型。图3示出了直线型超导带材的两维模型；图4示出了螺旋型超导带材的三维模型。

[0046] 以下举例说明当超导带材为螺旋形缠绕时的双极性高温超导直流系统的高温超导体电流密度分布的仿真分析方法，所述双极性高温超导直流系统包括高温超导直流电缆，所述高温超导直流电缆的超导体呈螺旋形缠绕，其特征在于，超导体电流密度分布的仿真分析方法包括如下步骤：

[0047] 步骤1) 在COMSOL软件中建立超导直流电缆的超导带材的三维模型：

[0048] 建立超导带材和空气域的横截面，设置一条三维螺旋曲线，三维螺旋曲线的轴向长度为 $L=P/m$ ，其中P为超导带材的螺距，m为超导带材的根数，在本实施例中 $m=10$ ；将超导带材和空气域的横截面沿着该三维螺旋曲线进行扫掠，得到三维模型，如图4所示，剖分图中旋转的黑色区域即为超导带材；当 $m=10$ 时，超导带材的根数为10根，三维模型的横截面

在周向上每旋转 $36^\circ$ 都一样,因此在建立模型时在轴向上只仿真1/10个螺距。

[0049] 步骤2) 设置超导带材的三维模型参数:

[0050] 2.1) 通过E-J特性设置超导导体的电场和电流密度的非线性关系:

$$[0051] \quad E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

[0052] 式(1)中, $E_c$ 为超导材料失去超导态时的场强大小,取标准值 $1 \times 10^{-4} \text{V/m}$ ;  $J$ 为超导带材运行时的电流密度; $J_c$ 为超导带材的临界电流密度,其值具有各向异性,数值与超导带材的特性有关,一般可通过超导带的临界电流除以超导带的横截面面积来求得临界电流密度, $n$ 表征超导体从超导态向正常态转变的速率的一个拟合值,取值为10-30;由于仿真时液化天然气的温度为90K,故设 $n$ 为10。

[0053] 2.2) 在超导带材横截面外的闭合方形积分路径上通过逐点约束来加载电流:

$$[0054] \quad \sum_{i=1}^n H_i L_i = I_0 \quad (2)$$

[0055] 式(2)中, $H_i$ 为闭合方形积分路径上的磁场强度, $L_i$ 为积分路径长度, $\sum_{i=1}^n L_i$ 构成闭合的方形积分路径;设置所加电流 $I_0$ 为各根高温超导带材在90K下的临界电流之和的一半;

[0056] 步骤3) 由于超导带材模型的非线性度很高,因此在COMSOL中直接应用稳态求解器时无法得到收敛的结果。在COMSOL软件中采用瞬态求解器,通过缓慢加电流的方式来让模型逐渐收敛,采用的瞬态电流表达式为:

$$[0057] \quad I = I_0 \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

[0058] 式(3)中, $I_0$ 为各根超导带材在90K下的临界电流之和的一半, $\tau$ 为设置的激励时长常数,取值为0.001s, $t$ 为瞬态仿真的总时长,为了得到稳态的效果,瞬态仿真的总时长必须足够长使得激励电流能够接近稳态值, $0 < t \leq 5\tau$ ;

[0059] 步骤4) 对每根超导带材上的电流密度分布进行仿真,得到每根超导带材横截面上的电流密度分布;电流密度在超导带材横截面上积分即可得到每根超导带上流经的电流大小,电流密度分布结果如图5所示。

[0060] 步骤5) 计算每根超导带材横截面上电流密度小于 $0.5J_c$ 的区域面积 $S$ ,根据该区域面积 $S$ 计算面积比 $K = S/S_{\text{total}}$ , $S_{\text{total}}$ 表示一根超导带材的横截面面积,得到所有超导带材中的最大的面积比 $K_{\text{max}}$ 和最小的面积比 $K_{\text{min}}$ ,计算超导导体的带材横截面利用率 $\eta_0 = K_{\text{min}}/K_{\text{max}}$ ;衡量超导带材的横截面利用率时采取比较各超导带上电流密度小于 $0.5J_c$ 的区域面积占超导带材横截面面积的比值,不同超导带上的面积比值大小不一样,取最小面积比值和最大面积比值之比作为超导带材的横截面利用率。最小面积比值和最大面积比值之比越大,超导带材横截面利用率越高。由于磁场对超导电缆任一横截面上的10根超导带材影响不一致,故在横截面上来看,每根超导带材上电流密度小于 $0.5J_c$ 的区域面积占超导带材横截面面积的比值大小不相等,也即超导带材的横截面利用率小于1。

[0061] 步骤6) 设置超导导体的整体利用率为 $\eta = \cos\theta \cdot \eta_0$ ,其中 $\theta$ 为超导带材的缠绕角,超导带材的缠绕角 $\theta$ 是根据 $\theta = \arctan(2\pi r/P)$ 计算,其中 $r$ 为超导导体内侧的铜支撑管的半径, $P$ 为超导带材的螺距;

[0062] 步骤7) 计算超导导体整体利用率最高时的超导带材螺距。

[0063] 进一步地, 步骤2) 的设置超导带材的三维模型参数还包括边界条件的设定: 在超导带材6倍外径处和两轴的中心面处设置磁绝缘边界, 使得周向边界上的磁场和边界平行, 在轴线上的端面边界施加周期性边界条件, 使得两个边界上的磁场相等。为了保证两轴中心面处的磁场平行于中心面, 需要让双极电缆螺旋超导带的缠绕方向相反。

[0064] 在上述步骤6) 中, 假设超导带材缠绕的螺距为460mm且 $r=13\text{mm}$ 时, 此时超导带材的缠绕角为 $10.1^\circ$ , 仿真计算出超导带材的横截面利用率为89.3%, 即所有超导带材中的最大的面积比 $K_{\max}$ 和最小的面积比 $K_{\min}$ 的比值为89.3%。

[0065] 取此利用率89.3%作为横截面上带材的最小利用率, 要求螺距变化时, 带材的横截面利用率不能小于此值。由于当螺距变大时, 带材上电流分布会变得不均匀, 带材的横截面利用率变小, 故最大螺距为460mm。

[0066] 在选取最小螺距时, 假设带材的横截面利用率为1, 也即此时电流分布均匀, 其带材总利用率不应小于最大螺距时的带材总利用率, 也即

[0067]  $\theta_{\max} \leq \arccos(\cos(10.1^\circ) * 0.893) = 28.5^\circ$

[0068] 故最大缠绕角为 $28.5^\circ$ , 此时对应的最小螺距为151mm。故通过以上优化方法, 能够保证电流在超导带上分布均匀且带材的用量较少, 优化的螺距范围为151mm-460mm。在此螺距范围内进行仿真, 可以通过不断调整螺距求解带材整体利用率, 取带材整体利用率最高的一个螺距作为最佳螺距。

[0069] 由此可见, 本发明提出了一种考虑超导带材整体利用率的高温超导直流系统电流密度分布的仿真分析方法, 首先对超导直流电缆导体建立三维模型, 并通过求解三维模型得到超导体上的电流分布, 优化超导带材螺距来改善带材的整体利用率。



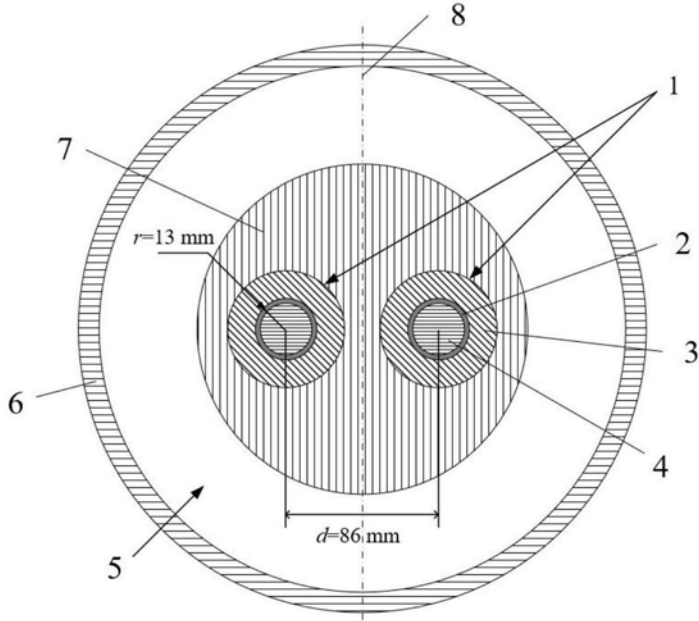


图1

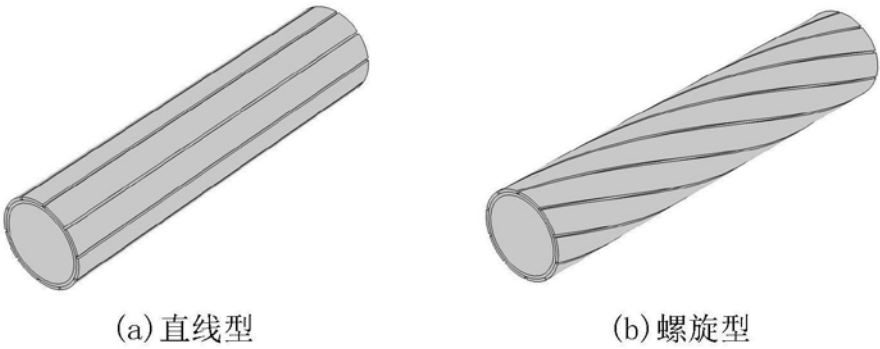


图2

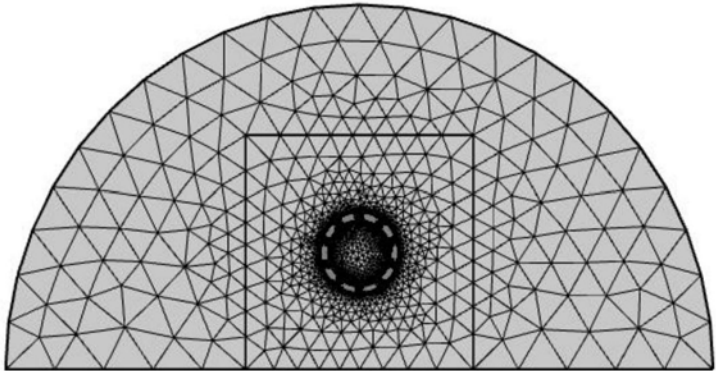


图3

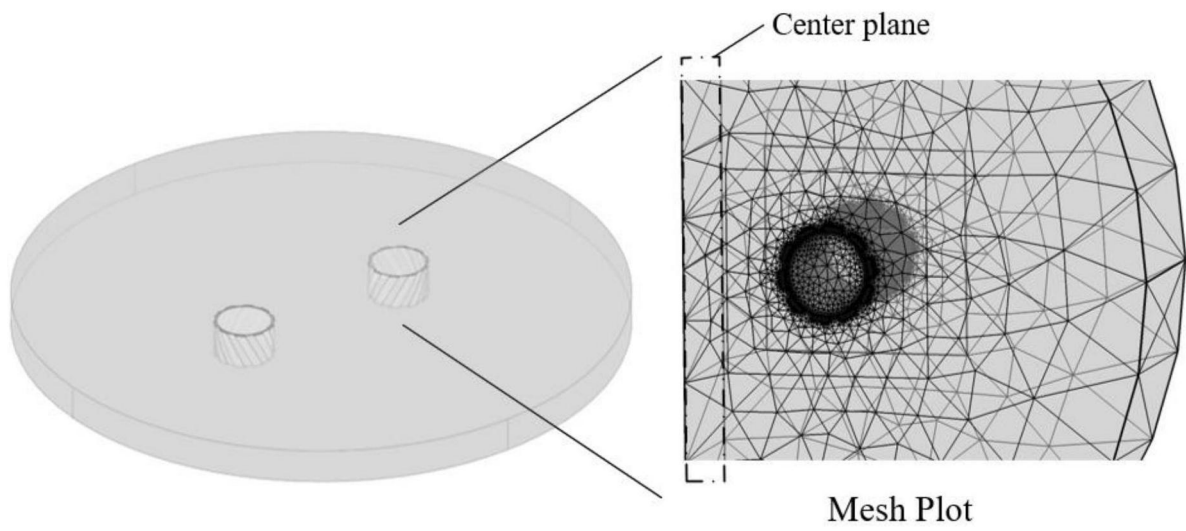


图4

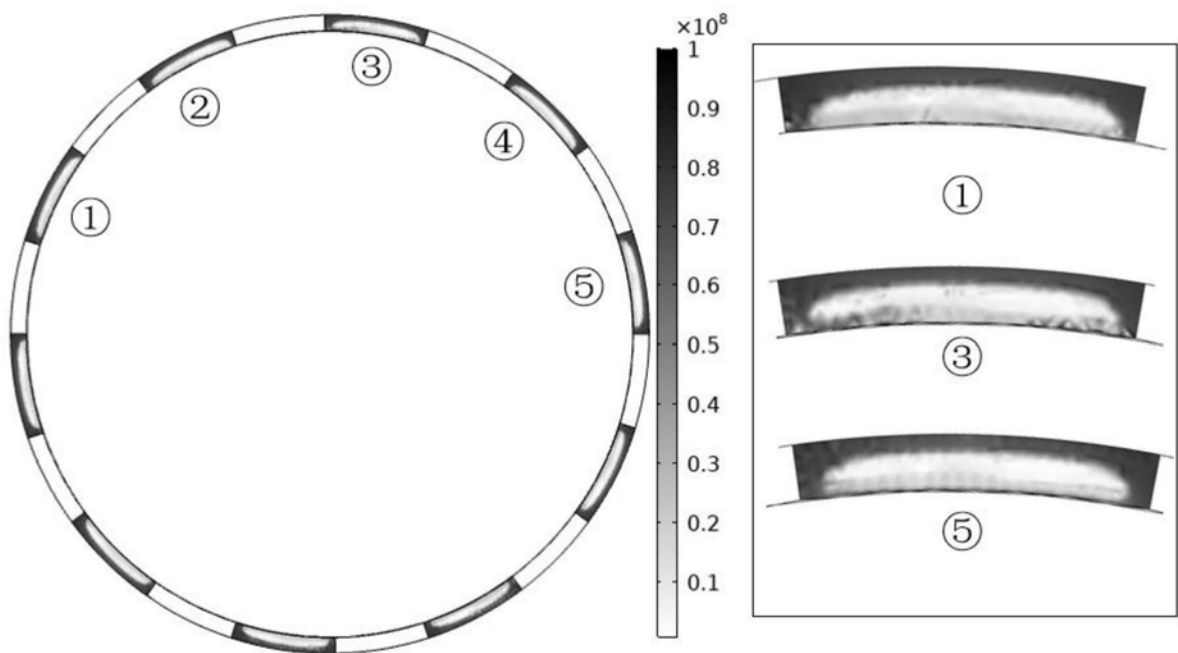


图5