



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115846322 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 28

(21) 申请号 202211597876.X

(22) 申请日 2022.12.14

(71) 申请人 福州大学

地址 350108 福建省福州市闽侯县福州大学城乌龙江北大道2号福州大学

(72) 发明人 李卫东 李爽 王单 游小可

杨杨 陈茂荣 张翰卿

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司

公司 35100

专利代理师 谢晓德 蔡学俊

(51) Int. Cl.

B08B 9/055 (2006.01)

B08B 7/00 (2006.01)

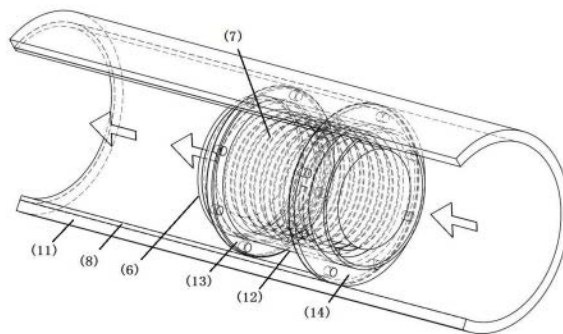
权利要求书1页 说明书6页 附图6页

## (54) 发明名称

一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统及方法

## (57) 摘要

本发明涉及一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,由清管器和输油管道组成,清管器中搭载有高频交变磁场发生装置,即所述清管器的圆柱骨架上螺旋缠绕有电性连接交流电的感应线圈,所述输油管道的内管壁上设置有纳米涂层,高频交变磁场能够和管道内壁的超顺磁纳米涂料作用使其产热,能够有效而精确地实现在目标区域加热融蜡,且针对低温、强换热、结蜡问题严重的海底油气管道尤其适用。由于金属管道的屏蔽作用,感应线圈产生的磁场线无法穿透管壁,并几乎完全局限于螺旋管环形空间内,这对于维持强磁场强度以产生热量非常有利。



1. 一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,由清管器和输油管道组成,其特征在于:所述清管器的圆柱骨架上螺旋缠绕有电性连接交流电的感应线圈,所述输油管道的内管壁上设置有纳米涂层。

2. 根据权利要求1所述的超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,其特征在于:所述输油管道的管壁由外至内依次由外层钢管壁、外保温层、内层钢管壁、内保温层、纳米涂层组成。

3. 根据权利要求1所述的超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,其特征在于:所述清管器的前刮蜡板直径比后刮蜡板直径小,前刮蜡板在清管过程中处于蜡层表面进行导向。

4. 根据权利要求2所述的超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,其特征在于:所述内保温层的厚度设置为0.5 mm。

5. 一种如权利要求1-4任一所述的超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统的工作方法,其特征在于,按以下步骤进行:当清管器在动力单元的驱动下开始沿着油流方向运动时,同时在感应线圈两端加上电压,从而让感应线圈上产生平稳的交流电,进而在螺旋管环形空间内生成稳定的感应磁场,感应磁场让含有超顺磁纳米涂层铁磁流体的纳米涂层产生尼尔弛豫,通过这种方式,将电磁能转化为热能,当纳米涂层产生热能后,热量的传递方向分为两路:一路向内传递到蜡层,一路向外传递到管壁,通过将热量向内传递到蜡层,加热软化紧靠纳米涂层的边缘蜡层。

## 一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统及方法。

### 背景技术

[0002] 清管器清管是一种常用的油气管道维护和清理手段,可以清除管内的积液、杂物、沉积物和腐蚀产物等。我国大部分原油为含蜡原油和稠油,高含蜡原油管道运行一定时间后,由于原油本身的物理化学性质、输油过程中石油温度的下降、石油转输系统的工作模式、溶解在石油中的气体含量的变化,管壁上会产生蜡沉积现象,使输油管道内径减小,磨阻增加,降低了管道输油能力。如果长时间没有进行过清管作业,管壁沉积物的抗剪切强度会逐渐变大,当其达到一定程度时,再进行清管作业则可能会发生清管器卡堵事故,导致管道无法正常输送,甚至有可能造成管道部分管段薄弱处因憋压而发生原油泄漏事故,导致不可估量的经济损失并对周边环境造成严重污染。

[0003] 目前常用的清管方法主要分为化学方法和物理方法两大类。常见的化学方法有:一、使用溶剂提高石油的溶解性。二、使用在管道内壁涂抹石蜡沉积抑制剂。这些化学方法虽然简单易行,但会带来油管、油料污染等问题。物理方法主要是指在清管器本体内部安装旁通阀,使原油在通过阀门后产生,过程中通过“射流”效应来粉化管道内的蜡垢,同时给清管器配备不同的清蜡工具,如铁刷和聚氨酯刮刀等来达到更好的清蜡效果。其具体方法一般有两种:一种是利用清管器的皮碗或直板来刮除管道内的沉积蜡,这常用于较短管路的清洗作业;另一种是在清管器本体建立泄流孔,通过从泄流孔泄漏的流体产生的压力,来使管壁上的蜡沉积物粉化并被携带至下游。然而,这种方法容易在清管器前方形成蜡塞使其卡堵,并且由于清管器位置无法确定,可能造成事故。因此,现有常用的化学、物理清管方法都有不同的缺陷,清管技术仍需新的优化发展契机。

[0004] 清管器的优化对于提高运输效率有重要意义。浙江浙能天然气运行有限公司申请了专利:一种自旋转的输油管道防卡堵的清管器,CN202220018219.4。该装置包括第一轴体、第二轴体、刷体以及第一皮碗;第二轴体通过轴承与第一轴体转动式连接,第二轴体外表面设有螺纹;刷体为环状并套设于第二轴体外,刷体内表面通过连杆与第二轴体外表面连接;第一皮碗套设于第一轴体外并且与第一轴体固定连接,具有防卡堵性强的特点。

[0005] 中国石油化工股份有限公司;中国石油化工股份有限公司中原油田普光分公司申请了专利:一种管道清管器,CN202123244981.9。该装置安装柱和套设固定在安装柱外部且用于与管道配合的密封盘,安装柱内设有前后延伸的空腔,安装柱的前端设置有与空腔连通的第一过流孔,安装柱的后端设有前端延伸至空腔的后腔壁和后端延伸至安装柱的后端面的第二过流孔,安装柱的后端还设置有导流孔;第二过流孔内由前向后依次安装有定位件、弹性件以及密封球,弹性件的前后两端分别顶压在定位件和密封球上,密封球具有受弹性件顶压而封堵小径孔的封堵工位,还具有受管道内流体作用而向前移动并使小径孔和大径孔连通的连通工位。可以实现调节管道内压差,使得管道清管器不会受到冲击且其运行过程能够保持平稳。

[0006] 由此可见,已有公开的相关专利一方面集中在改进清管器的结构层次防止卡堵上,另一方面集中于利用“射流”效应和提高清管器稳定性上。尚未见管道和清管器配合利用磁流体加热技术实现除蜡目标的清管技术。

## 发明内容

[0007] 鉴于现有技术的不足,本发明所要解决的技术问题是提供一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统及方法。

[0008] 为了解决上述技术问题,本发明的技术方案是:一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,由清管器和输油管道组成,所述清管器的圆柱骨架上螺旋缠绕有电性连接交流电的感应线圈,所述输油管道的内管壁上设置有纳米涂层。

[0009] 优选的,所述输油管道的管壁由外至内依次由外层钢管壁、外保温层、内层钢管壁、内保温层、纳米涂层组成。

[0010] 优选的,所述清管器的前刮蜡板直径比后刮蜡板直径小,前刮蜡板在清管过程中处于蜡层表面进行导向。

[0011] 优选的,所述内保温层的厚度设置为0.5 mm。

[0012] 一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统的工作方法,按以下步骤进行:当清管器在动力单元的驱动下开始沿着油流方向运动时,同时在感应线圈两端加上电压,从而让感应线圈上产生平稳的交流电,进而在螺旋管环形空间内生成稳定的感应磁场,感应磁场让含有超顺磁纳米涂层铁磁流体的纳米涂层产生尼尔弛豫,通过这种方式,将电磁能转化为热能,当纳米涂层产生热能后,热量的传递方向分为两路:一路向内传递到蜡层,一路向外传递到管壁,通过将热量向内传递到蜡层,加热软化紧靠纳米涂层的边缘蜡层。

[0013] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:使用超顺磁纳米涂层加热法软化管道蜡层,有效降低了清管阻力,进而降低了清管器卡堵的风险,提高了清管效果。绿色环保,克服了化学清管法容易污染环境的缺点。结构简单,成本低廉,维护方便,降低了海底管道的运营成本。

[0014] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步详细的说明。

## 附图说明

[0015] 图1为本发明实施例的构造示意图。

[0016] 图2为图1中输油管道的构造示意图。

[0017] 图3为加热效果验证的现场蜡沉积物示意图。

[0018] 图4为加热效果验证的实验蜡样制备示意图。

[0019] 图5为加热效果验证的蜡样屈服应力测试示意图。

[0020] 图6为加热效果验证的蜡样屈服应力与温度的关系示意图。

[0021] 图7为COMSOL建模的模型几何示意图。

[0022] 图中:(1)海水,(2)外层钢管壁,(3)外保温层,(4)内层钢管壁,(5)油流,(6)清管器,(7)感应线圈,(8)蜡沉积层,(9)纳米涂层,(10)内保温层,(11)输油管道,(12)圆柱骨架,(13)前刮蜡板,(14)后刮蜡板。

## 具体实施方式

[0023] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步说明。

[0024] 应该指出,以下详细说明都是示例性的,旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

[0025] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0026] 如图1~7所示,本实施例针对现有清管器易发生蜡堵事故、维护复杂、成本高昂的问题,提供了一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统,由清管器和输油管道组成,清管器中搭载有高频交变磁场发生装置,即所述清管器的圆柱骨架上螺旋缠绕有电性连接交流电的感应线圈,所述输油管道的内管壁上设置有纳米涂层,高频交变磁场能够和管道内壁的超顺磁纳米涂料作用使其产热,能够有效而精确地实现在目标区域加热融蜡,且针对低温、强换热、结蜡问题严重的海底油气管道尤其适用。由于金属管道的屏蔽作用,感应线圈产生的磁场线无法穿透管壁,并几乎完全局限于螺旋管环形空间内,这对于维持强磁场强度以产生热量非常有利。

[0027] 在本发明实施例中,所述清管器的基本结构与传统机械清管机是一致的,主要由一个圆柱形金属骨架和几个聚氨酯盘式刮刀(前、后刮蜡板)组成。

[0028] 在本发明实施例中,所述输油管道的管壁由外至内依次由外层钢管壁、外保温层、内层钢管壁、内保温层、纳米涂层组成。

[0029] 在本发明实施例中,所述清管器的前刮蜡板直径比后刮蜡板直径小,前刮蜡板在清管过程中处于蜡层表面进行导向。因此,前刮蜡板实际上起到的是导向作用而不是切削作用,真正去除蜡沉积物的是后刮蜡板。

[0030] 在本发明实施例中,所述内保温层的厚度设置为0.5 mm。内保温层的设置解决了因碳钢导热性能良好使纳米涂层产生的热量容易向外传递到管壁,造成热量损失的问题。因0.5 mm和1mm内保温层厚度表现出相当接近的蜡阻力降低率,表明0.5 mm的厚度足以保温,进一步增加保温层厚度并不能有效地降低蜡阻力,因此将内保温层的厚度设置为0.5 mm。

[0031] 在本发明实施例中,超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统的基本原理为:由于超顺磁性磁流体具有无剩磁、矫顽力为零,微粒尺寸小等特点,因此其在交变磁场下主要产热机制是磁后效效应。许多实验证明,超顺磁流体在交变磁场下主要由磁矩克服磁各项异性势垒引起的尼尔弛豫产热。在电磁清管器进入管道工作后,自身搭载的磁场发生器会产生交变磁场。管道内壁纳米涂料中的磁性纳米粒子在此外加磁场的作用下,磁矩开始震荡,其磁感应强度先是达到一个亚稳态,然后滞后地达到新的稳态。该过程会损耗纳米粒子的磁能,损耗的磁能被转换成了热能。管道内壁温度随之升高,表面的蜡层逐渐软化,待后刮蜡板到来时蜡层应力已大大减小,后刮蜡板可将积蜡刮下,达到清管、保障管道正常输送的目的。

[0032] 一种超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统的工作方法,按以下步骤进

行:当清管器在动力单元的驱动下开始沿着油流方向运动时,同时在感应线圈两端加上电压,从而让感应线圈上产生平稳的交流电,进而在螺旋管环形空间内生成稳定的感应磁场,感应磁场让含有超顺磁纳米涂层铁磁流体的纳米涂层产生尼尔弛豫,通过这种方式,将电磁能转化为热能,当纳米涂层产生热能后,热量的传递方向分为两路:一路向内传递到蜡层,一路向外传递到管壁,通过将热量向内传递到蜡层,加热软化紧靠纳米涂层的边缘蜡层。经由蜡层软化实验证明,清蜡阻力可降低20%~40%。

[0033] 在本发明实施例中,超顺磁性材料是单畴超顺磁纳米颗粒的集合体。在没有磁场的情况下,粒子的磁矩的方向是随机的。当置于交流磁场中时,粒子的磁矩会不断振荡以克服磁各向异性势垒。由于超顺磁性磁流体具有如下特性:零剩磁、矫顽力为零,微粒尺寸小等特点,因此超顺磁性磁流体在交变磁场下主要产热机制是磁后效效应。这是指当外磁场发生突变,材料的磁感应强度先是达到一个亚稳态,然后滞后地达到新的稳态,这属于一种弛豫过程。对于纳米磁流体来说,主要存在2种弛豫机制:布朗弛豫(Brownian relaxation)和尼尔弛豫(Neel relaxation)。许多实验证明,超顺磁流体在低频交变磁场下主要由磁矩克服磁各向异性势垒引起的尼尔弛豫产热。通过这种方式,电磁能就被转换成热能。

[0034] 在本发明实施例中,该超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统的加热效果验证如下:

实验验证蜡层软化效果包含旋转流变仪测蜡沉积物的屈服应力和使用COMSOL软件对线圈产生的磁场进行数值模拟,以检查电磁清管系统的性能。

#### [0035] 1、测定屈服应力

为探究蜡沉积物屈服应力与温度的关系,采用原油和实际管道蜡沉积物制备了实验蜡样。图3所示为现场蜡沉积物实物照片,表1为现场蜡沉积物的部分基本物性。

[0036] 表1 现场蜡沉积物基本物性

析蜡点 (°C)	析蜡高峰点 (°C)	含蜡量 (%)	沥青质含量 (%)
70.72	68.1	57.71	1.81

将现场油样与现场蜡沉积物按照不同比例掺混制备实验蜡样。根据掺蜡比例的大小,分别设置30%、50%和70%的油蜡混合物的搅拌时间为30 min(掺蜡时间20 min)、45 min(掺蜡时间30 min)和60 min(掺蜡时间45 min),保证掺蜡完毕后剩余10-15 min的时间进行搅拌熔化。熔蜡过程如图4所示。

[0037] 采用屈服应力作为蜡样强度指标。首先将蜡样、转子和装样筒预热至80°C后迅速装样,恒温10 min,然后将温度降至清蜡实验温度并恒温一小时,最后启动测试程序。采用控应力对数加载方式,初始加载应力为0.1 Pa,两个应力数量级之间的加载时间为100 s,数据采集频率为5 Hz。图5给出了掺蜡比例为30%的蜡样在30°C时的屈服应力测试结果。在应力加载的初始阶段,蜡样内部的蜡晶骨架结构未被破坏,应变非常小。当施加的应力达到某一临界值时,蜡样内部蜡晶骨架突然被破坏,应变急剧增大,应变突然变大的点所对应的应力值即为屈服值。图中测得的屈服应力为58800 Pa。重复性实验结果表明,屈服应力测试的相对偏差小于5.6%。

[0038] 采用控应力旋转流变仪Anton Paar RheolabQC测定蜡样屈服应力。测定了蜡沉积



物含量为30%、50%和70%的蜡样的屈服应力。如图6所示，蜡样屈服应力与温度呈线性相关。

$$[0039] \quad \tau_w = at + b$$

式中， $\tau_w$ 为蜡样的屈服应力，Pa； $t$ 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $a$ 和 $b$ 为待定系数。

[0040] 清管过程中的蜡层阻力是清管器发生卡球事故的决定性因素。假设当清管器施加在蜡层上的应力达到蜡层的屈服应力时蜡沉积物被破坏剥离，因此蜡层阻力可用下式计算：

$$F_w = \pi d \delta_w \tau_w$$

式中 $F_w$ 为清蜡阻力，N； $d$ 为管道内径，m； $\delta_w$ 为蜡层厚度，m。

[0041] 当蜡层被纳米涂料加热时，蜡层-涂层界面处温度较高，蜡层-原油界面处温度较低。将蜡层的横截面划分为无限多个环形圈，每个微元环形圈产生的蜡层阻力可以用方程(8)计算，蜡层产生的整体清管阻力可通过积分获得：

$$F_w = \int_R^{R+\delta_w} 2\pi r(at + b) dr$$

式中 $R$ 为油流通道的半径，m。

## [0042] 2、COMSOL建模

使用COMSOL软件对线圈产生的磁场进行数值模拟，以检查电磁清管系统的性能。

### [0043] (1) 物理模型参数定义

模型设定电流、磁场强度、蜡层厚度、内外圈管道的管径为可变参数，同时定义线圈长度与线圈距纳米涂层距离的比值为一个新的可变参数“BZ”，通过这个比值，可以适配市面上更多类型的清管器，只要比值相同，无论可调整的是线圈长度还是线圈距纳米涂层的距离，都可以近似模拟其加热效果。

### [0044] (2) 建立模型几何

根据实际生产工况，将海底管道模拟为圆柱形管道，有绝缘层、管道层、蜡层和油层，并设有内圈管道和外圈管道，两层管道中间夹有保温材料，超顺磁纳米涂层设置在内圈管道内壁，外圈管道外的环境定义为无限元域的海水。如图7所示，为一维轴对称管道截面图。

### [0045] (3) 确定适当的边界和域条件

由于COMSOL模型只对单段管道进行了计算，因此假定流体在稳态下是静止的。管道内携带一个磁场发生器，依照目前的市场规格将其定义为一个均匀多匝的铜线圈。采用感应加热模块，对不同表面施加对应的磁场边界条件。

### [0046] (4) 确定初始温度，设立温度探针

选定原油的初始温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ，管壁及蜡层温度为 $20^{\circ}\text{C}$ ，海水温度为 $4^{\circ}\text{C}$ 。通过热流密度连续的边界条件使这些物理层多元耦合。并定义了一个表面温度探针来测量涂层-蜡界面的实时温度。

### [0047] (5) 分析与处理结果

导出整体温度分布图、清管器几何模型、温度探针表以及磁通密度图,来全方位多角度地研究其加热除蜡效果。对于一个给定的纳米涂料—蜡系统,要优化加热效果,可以通过调整线圈的位置或半径来完成。

[0048] 当导出结果与预期不符时,可通过调整线圈几何位置,或改变电流、线圈匝数以及磁场大小等可输入参数,来进行实际运用中的选取。

[0049] 利用公式确定蜡层温度分布的热源,然后用公式计算清管阻力。如表2所示,与常规清管器相比,电磁清管器的使用使清管阻力显著降低了20%~40%,从而证明了本研究开发的电磁清管系统在降低油气管道清管过程中的卡球事故风险的潜力。

[0050] 表2 电磁清管器和常规清管器清蜡阻力的比较

掺蜡比例	30%	50%	70%
常规清管器清蜡阻力 (N)	63.8	228.8	686.4
电磁清管器清蜡阻力 (N)	37.3	162.4	543.4
清蜡阻力降低率 (%)	41.6	29.0	20.8

综上所述,所述的超顺磁纳米涂层辅助加热的原油管道清管系统具有以下特点:

(1)超顺磁纳米涂层辅助清管器系统使用超顺磁纳米涂层加热法软化管道蜡层,有效降低了清管阻力,进而降低了清管器卡堵的风险,提高了清管效果;

(2)超顺磁纳米涂层辅助清管器系统绿色环保,克服了化学清管法容易污染环境的缺点;

(3)电磁清管器设备结构简单,成本低廉,维护方便,降低了海底管道的运营成本。

[0051] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非是对本发明作其它形式的限制,任何熟悉本专业的技术人员可能利用上述揭示的技术内容加以变更或改型为等同变化的等效实施例。但是凡是未脱离本发明技术方案内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与改型,仍属于本发明技术方案的保护范围。



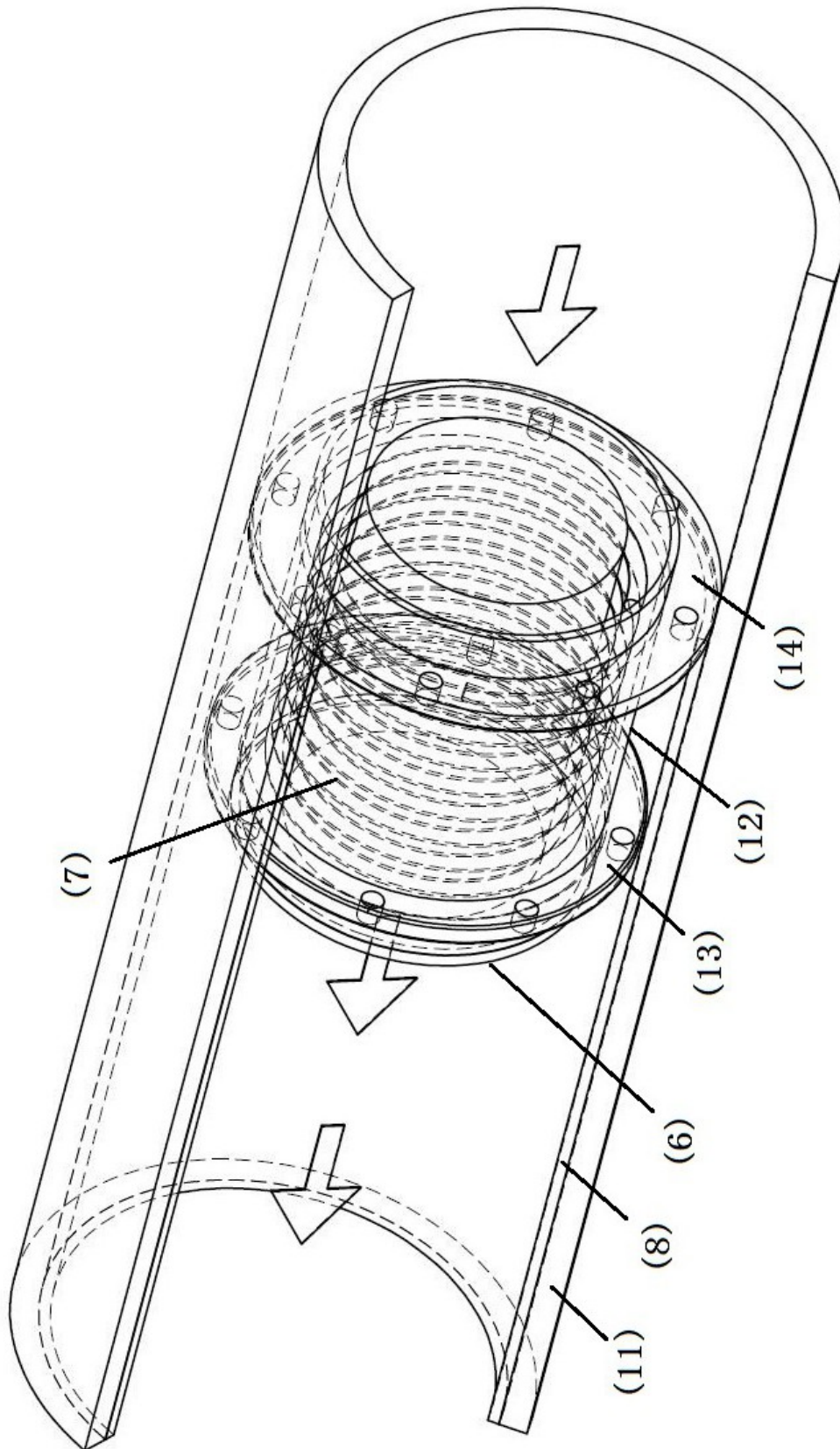


图1

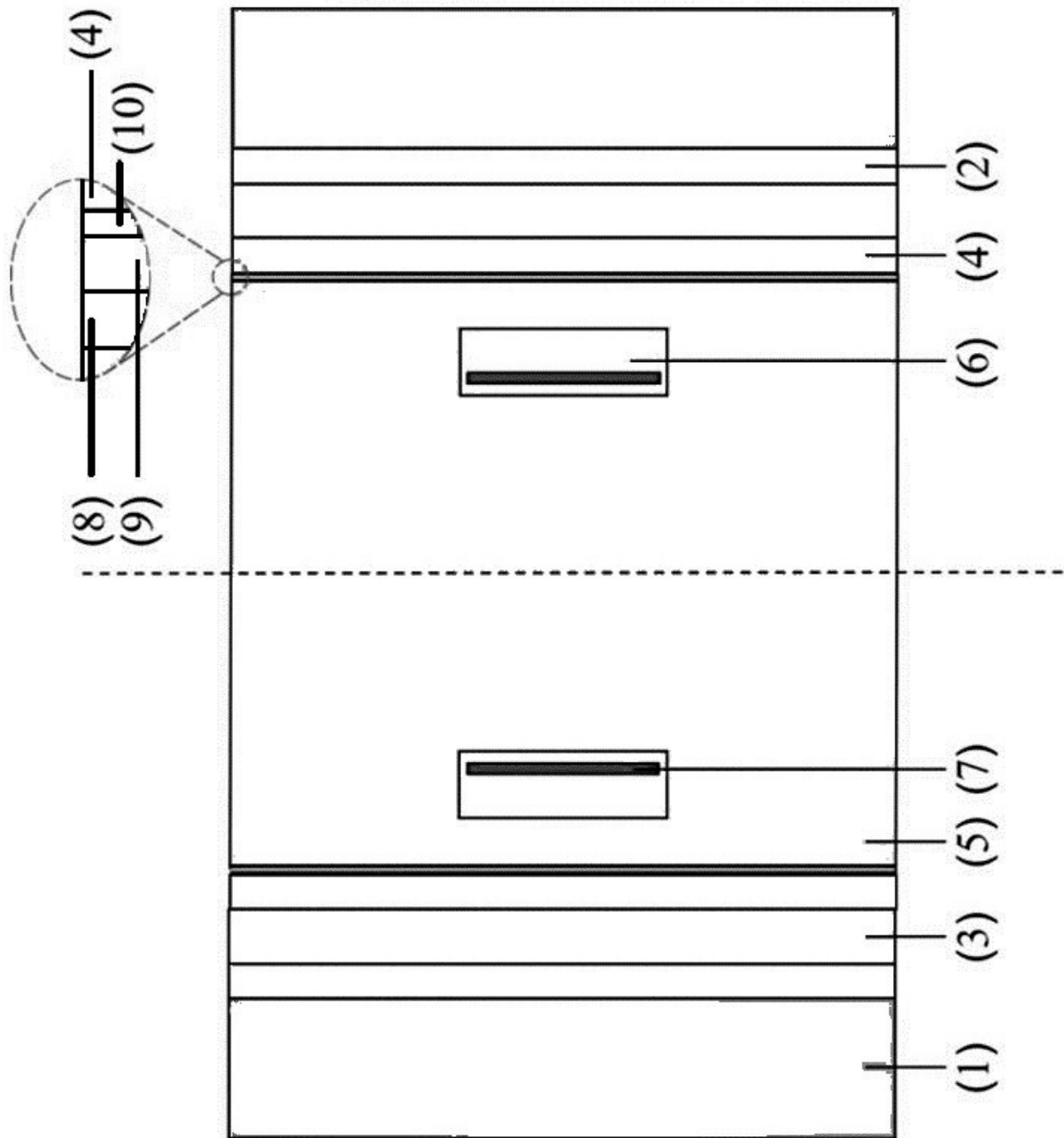


图2



图3

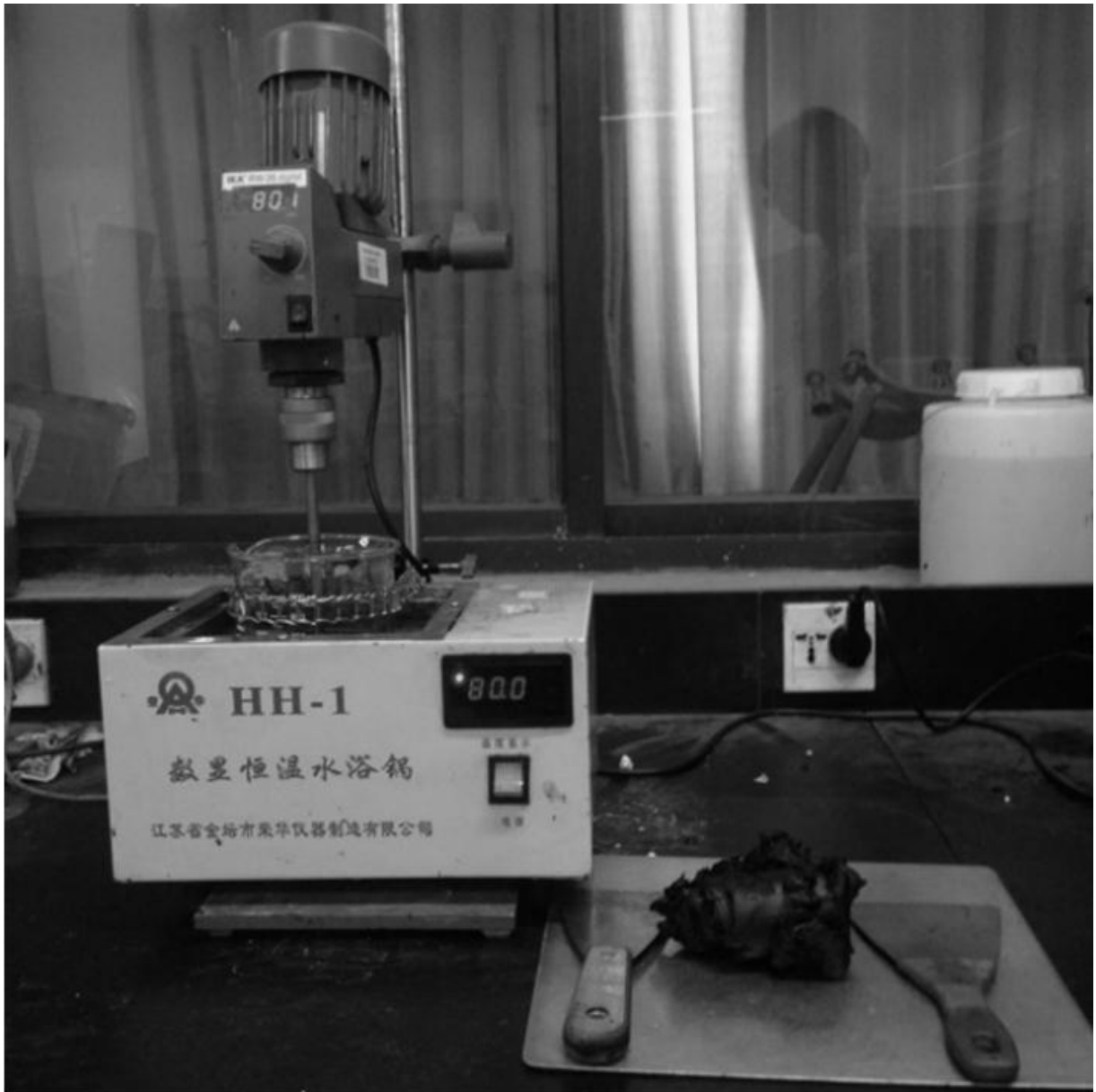


图4

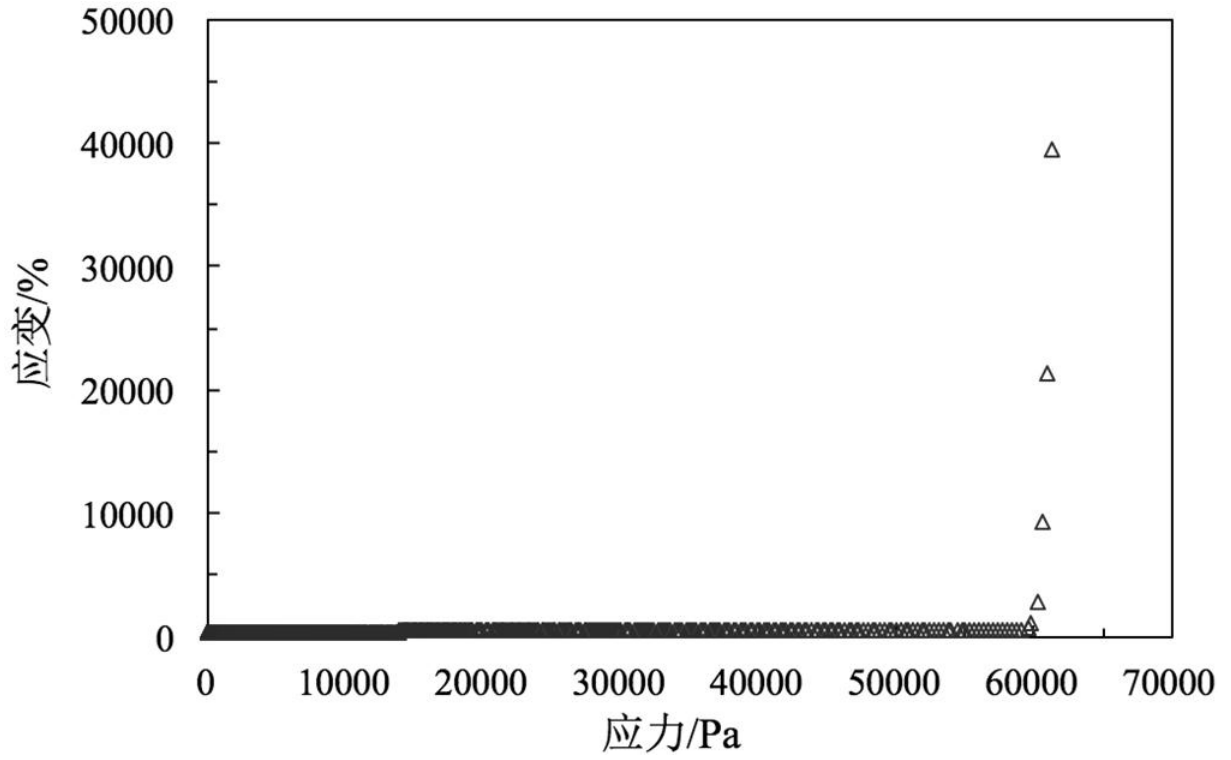


图5

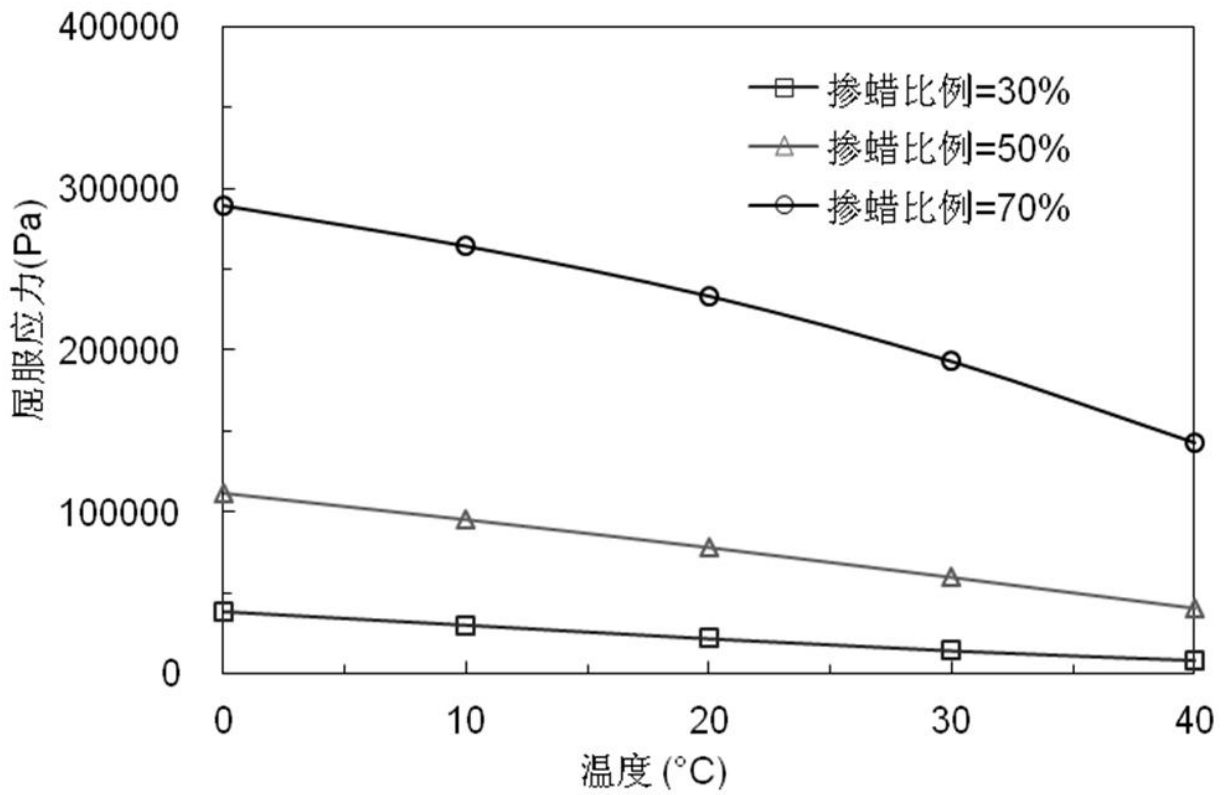


图6

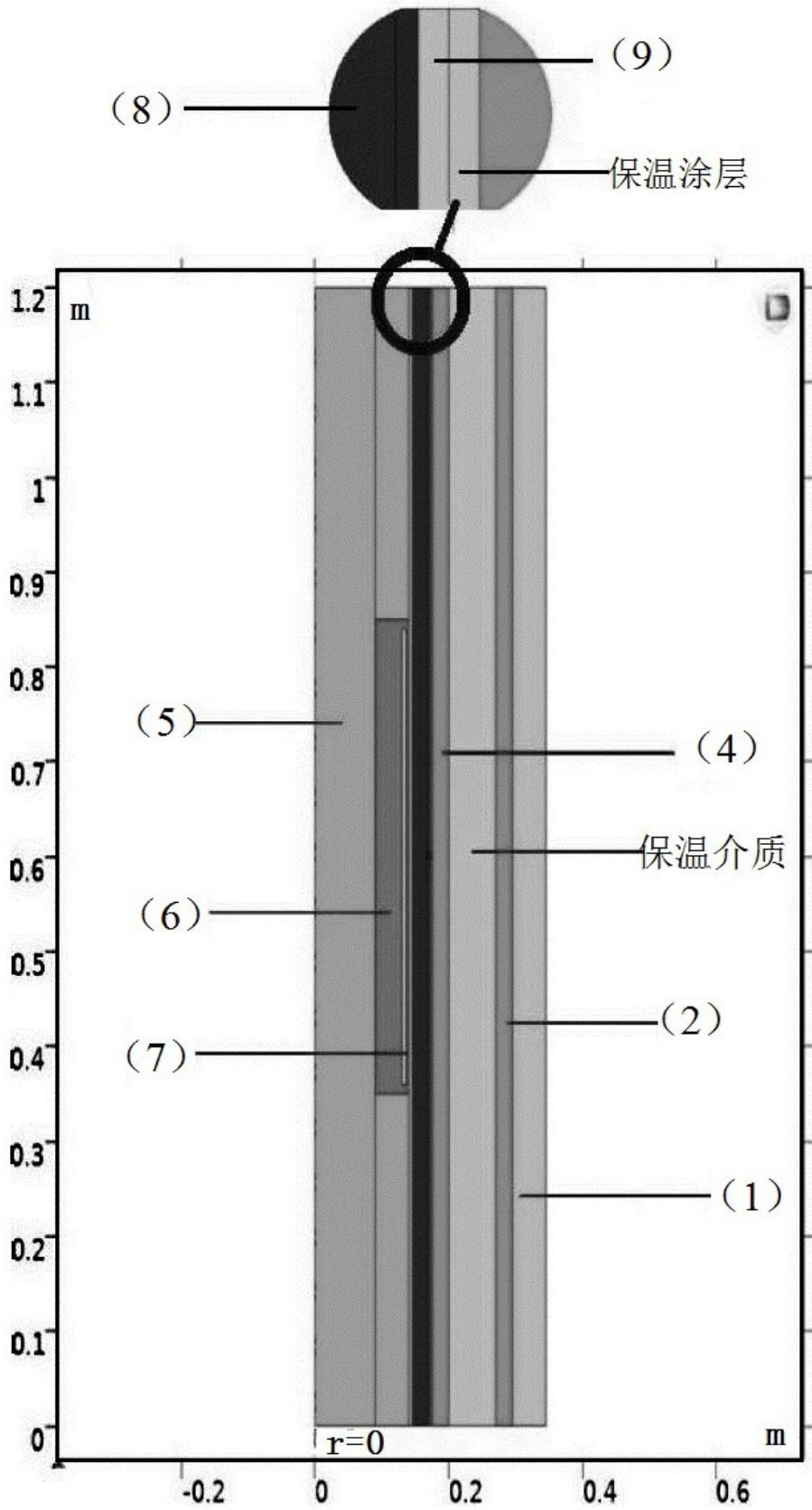


图7