

证书号 第 2299438 号



# 发明 专利 证书

发明名称：一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法

发明人：顾剑锋；徐骏；全大明；郜霞

专利号：ZL 2014 1 0478981.0

专利申请日：2014年09月18日

专利权人：上海交通大学

授权公告日：2016年11月30日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发本证书，并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年，自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年09月18日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨





(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104212969 B

(45)授权公告日 2016.11.30

(21)申请号 201410478981.0

C21D 9/08(2006.01)

(22)申请日 2014.09.18

审查员 肖睿

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104212969 A

(43)申请公布日 2014.12.17

(73)专利权人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 顾剑锋 徐骏 全大明 鄢霞

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 赵继明

(51)Int.Cl.

C21D 11/00(2006.01)

C21D 1/66(2006.01)

C21D 1/42(2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图5页

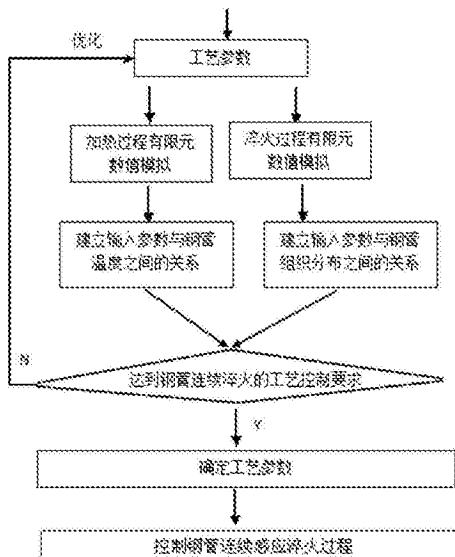
(54)发明名称

一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法，包括以下步骤：根据钢管移动线速度和淬火冷却喷水压力，计算连续感应淬火过程初始的工艺参数，包括加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数；对钢管连续感应加热过程进行有限元分析，获得加热过程工艺参数与钢管内外表面温度之间的关系；对钢管淬火冷却过程进行有限元分析，获得淬火过程工艺参数与钢管组织分布情况之间的关系；根据工艺控制要求，获取符合工艺控制要求的加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数，形成最终的钢管连续感应淬火过程控制参数；以获得的控制参数控制实际钢管连续淬火过程。与现有技术相比，本发明具有减少通过试制确定工艺参数所造成的能源消耗，提高工作效率等优点。

B  
CN 104212969



1. 一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法, 其特征在于, 所述的钢管连续淬火过程包括:

钢管连续感应加热过程: 钢管以一定线速度在托辊上直线运动, 经前矫直牵引机牵引拉动, 进入感应器组中进行奥氏体化, 加热结束经空冷段自然冷却;

钢管淬火冷却过程: 钢管进入喷射淬火冷却室, 冷却形成马氏体或贝氏体组织;

所述的钢管连续淬火过程采用的钢管连续感应淬火装置包括依次连接的前矫直牵引机、感应加热器组和喷射淬火冷却室, 所述感应加热器组为相互独立的感应加热炉, 所述感应加热器组与所述喷射淬火冷却室之间有一段空冷段;

所述的控制方法具体包括以下步骤:

步骤一、根据钢管移动线速度和淬火冷却喷水压力, 计算连续感应淬火过程初始的工艺参数, 包括加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数;

步骤二、对钢管连续感应加热过程进行有限元分析, 获得加热过程工艺参数与钢管内外表面温度之间的关系;

步骤三、对钢管淬火冷却过程进行有限元分析, 获得淬火过程工艺参数与钢管组织分布情况之间的关系;

步骤四、根据工艺控制要求和步骤二、三的结果, 获取符合工艺控制要求的加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数, 形成最终的钢管连续感应淬火过程控制参数;

步骤五、以步骤四获得的控制参数控制实际钢管连续淬火过程;

所述的步骤二具体为:

201) 建立钢管、感应线圈和空气的几何模型;

202) 获取20~1000℃温度范围内钢管的磁导率、电阻率、导热系数、比热容和密度以及感应线圈和空气的相对磁导率;

203) 计算钢管的集肤效应深度, 根据该深度进行网格划分, 划分网格时, 网格密度由钢管表面向外递减;

所述的集肤效应深度 $\delta$ 的计算公式如下:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu_r f}}$$

其中,  $\rho$ 为钢管的电阻率,  $\mu_r$ 为钢管的相对磁导率,  $f$ 为线圈励磁电流频率;

204) 设置感应加热工况, 根据步骤一计算的加热过程工艺参数设置加载步骤;

205) 进行网格检查和物理检查, 判断是否存在错误, 若是, 则提示错误信息, 若否, 则执行步骤206);

206) 保存感应加热各个阶段的温度随时间变化情况及钢管外表面和内表面温差随时间变化情况;

所述的步骤201)中, 建立钢管和感应线圈模型时, 将运动对象模型等效为静止对象模型。

2. 根据权利要求1所述的一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法, 其特征在于, 所述的加热过程工艺参数包括加热时间、空冷时间以及线圈励磁电流和频率;

所述的淬火过程工艺参数包括淬火冷却时间和钢管与淬火介质之间的换热系数。

3.根据权利要求1所述的一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,其特征在于,所述的步骤204)中,设置感应加热工况包括设定空气外边缘处磁势为零、设定线圈励磁电流及频率、设定空气和钢管间的热交换系数和辐射系数。

4.根据权利要求1所述的一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,其特征在于,所述的步骤三具体为:

- 301)建立淬火冷却过程的钢管模型;
  - 302)采用六面体八节点单元进行网格划分;
  - 303)获取20-1000℃温度范围内钢管的比热、热导率、相变焓和相变动力学参数;
  - 304)设定淬火过程的边界条件;
  - 305)根据步骤一计算的淬火过程工艺参数设置淬火冷却加载步骤;
  - 306)进行网格检查和物理检查,判断是否存在错误,若是,则提示错误信息,若否,则执行步骤307);
  - 307)保存淬火冷却过程中温度随时间的变化情况及钢管淬火结束后的组织分布情况。
- 5.根据权利要求4所述的一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,其特征在于,所述的步骤301)中,建立钢管模型时,以钢管横截面作为计算模型。
- 6.根据权利要求1所述的一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,其特征在于,所述的步骤四中,工艺控制要求为:加热过程中钢管内外表面的温差达到设定范围且钢管淬火后的组织分布达到设定范围。

## 一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种钢管连续淬火工艺,尤其是涉及一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法。

### 背景技术

[0002] 钢管淬火热处理对于钢管整体性能的提升起着十分重要的作用。其淬火工艺是将钢管加热至奥氏体化温度,使之全部或部分奥氏体化后,以大于临界冷却速度的速度快冷至Ms点以下。淬火冷却后,钢管的组织为马氏体、贝氏体和少量残余奥氏体组织。

[0003] 目前国内钢管的连续热处理设备主要为步进式火焰炉或电阻炉。这种生产方式工艺简单、设备成本较低,但能耗较高、污染严重。在使用该设备进行热处理时,需要严格控制钢管长度。此外,由于加热时间较长,使得连续生产过程的效率大大降低。在节能减排为主题的现代工业化潮流下,这种生产方式将逐步被新的热处理方式所淘汰。

[0004] 电磁感应加热原理主要是法拉第电磁感应定律和电流热效应的焦耳-楞次定律。当块状金属在感应炉中处于变化的磁场中时,金属块内会产生感应涡电流。由于块状金属电阻极小,涡流常常很强,并释放出大量的热量,在感应炉中正是利用这种涡流热效应来加热金属。

[0005] 感应加热过程清洁无污染,且完全可由数字电路控制,易于实现自动化连续生产。钢管在感应加热后表面氧化很少,基本没有脱碳,钢管外观质量好。在感应加热热处理过程中,加热时间很短,升温很快,连续热处理效率极高。此外,感应加热热源为工件本身,热损失较少。据统计,感应加热耗能比火焰炉低30%-50%,比电阻炉低20%-30%。

[0006] 目前国外感应热处理炉在钢管尤其是石油钢管的热处理中已经得到了应用和发展。如美国隆斯塔钢铁公司及日本川崎钢铁公司都用中频感应热处理炉。国内鞍钢和西宁特钢等也已将其引用到钢管生产中。然而,钢管在感应热处理生产过程中存在物理场复杂,材料物性参数及感应电磁参数变化大,淬火组织和性能差异显著等特点。因此,对设备和工艺要求较高。目前在制定感应热处理工艺方面普遍使用经验——试错的方法来调整工艺参数,具有较大的偶然性和不合理性,造成了设备和工艺设计的成本大大增加。中国专利申请“一种钢管的中频感应热处理装置及其热处理方法”(专利公布号:CN 1023638535A)提供了一种薄壁钢管的中频感应热处理装置及其热处理方法。对壁厚2mm左右的薄壁无缝管进行感应加热到1200℃仅需2s。但对于壁厚较大的钢管,由于集肤效应,其截面温度差异较大。近外表面升温速率远高于内部升温速率。较大的温差,将造成钢管受热不均匀,导致淬火软点、硬度不足,严重者将导致开裂,因此应用范围比较局限。

[0007] 钢管感应热处理过程是及其复杂的多物场、高温、动态和瞬时的过程,即使利用专用的传感检测仪器也难以观察到材料内部的物理性能变化。因此,对钢管在感应热处理生产过程中的工艺参数进行优化研究十分必要。

### 发明内容

[0008] 本发明的目的就是为了克服上述现有技术存在的缺陷而提供一种钢管连续感应淬火工艺参数设计方法,利用数值模拟方法,预测产品的质量,减少试验次数,优化工艺参数,进而确定最佳的工艺设计参数,减少通过试制确定工艺参数所造成的能源消耗,提高工作效率。

[0009] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0010] 一种基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,所述的钢管连续淬火过程包括:

[0011] 钢管连续感应加热过程:钢管以一定线速度在托辊上直线运动,经前矫直牵引机牵引拉动,进入感应器组中进行奥氏体化,加热结束经空冷段自然冷却;

[0012] 钢管淬火冷却过程:钢管进入喷射淬火冷却室,冷却形成马氏体或贝氏体组织;

[0013] 所述的控制方法具体包括以下步骤:

[0014] 步骤一、根据钢管移动线速度和淬火冷却喷水压力,计算连续感应淬火过程初始的工艺参数,包括加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数;

[0015] 步骤二、对钢管连续感应加热过程进行有限元分析,获得加热过程工艺参数与钢管内外表面温度之间的关系;

[0016] 步骤三、对钢管淬火冷却过程进行有限元分析,获得淬火过程工艺参数与钢管组织分布情况之间的关系;

[0017] 步骤四、根据工艺控制要求和步骤二、三的结果,获取符合工艺控制要求的加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数,形成最终的钢管连续感应淬火过程控制参数;

[0018] 步骤五、以步骤四获得的控制参数控制实际钢管连续淬火过程。

[0019] 所述的加热过程工艺参数包括加热时间、空冷时间以及线圈励磁电流和频率;

[0020] 所述的淬火过程工艺参数包括淬火冷却时间和钢管与淬火介质之间的换热系数。

[0021] 所述的步骤二具体为:

[0022] 201)建立钢管、感应线圈和空气的几何模型;

[0023] 202)获取20-1000℃温度范围内钢管的磁导率、电阻率、导热系数、比热容和密度以及感应线圈和空气的相对磁导率;

[0024] 203)计算钢管的集肤效应深度,根据该深度进行网格划分,划分网格时,网格密度由钢管表面向外递减;

[0025] 所述的集肤效应深度δ的计算公式如下:

$$[0026] \delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu_r f}}$$

[0027] 其中,ρ为钢管的电阻率,μ<sub>r</sub>为钢管的相对磁导率,f为线圈励磁电流频率;

[0028] 204)设置感应加热工况,根据步骤一计算的加热过程工艺参数设置加载步骤;

[0029] 205)进行网格检查和物理检查,判断是否存在错误,若是,则提示错误信息,若否,则执行步骤206);

[0030] 206)保存感应加热各个阶段的温度随时间变化情况及钢管外表面和内表面温差随时间变化情况。

[0031] 所述的步骤201)中,建立钢管和感应线圈模型时,将运动对象模型等效为静止对象模型。

[0032] 所述的步骤204)中,设置感应加热工况包括设定空气外边缘处磁势为零、设定线圈励磁电流及频率、设定空气和钢管间的热交换系数和辐射系数。

[0033] 所述的步骤三具体为:

[0034] 301)建立淬火冷却过程的钢管模型;

[0035] 302)采用六面体八节点单元进行网格划分;

[0036] 303)获取20-1000℃温度范围内钢管的比热、热导率、相变焓和相变动力学参数;

[0037] 304)设定淬火过程的边界条件;

[0038] 305)根据步骤一计算的淬火过程工艺参数设置淬火冷却加载步骤;

[0039] 306)进行网格检查和物理检查,判断是否存在错误,若是,则提示错误信息,若否,则执行步骤307);

[0040] 307)保存淬火冷却过程中温度随时间的变化情况及钢管淬火结束后的组织分布情况。

[0041] 所述的步骤301)中,建立钢管模型时,以钢管横截面作为计算模型。

[0042] 所述的步骤四中,工艺控制要求为:加热过程中钢管内外表面的温差达到设定范围且钢管淬火后的组织分布达到设定范围。

[0043] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0044] 1、本发明采用的钢管连续感应淬火装置为多级加热、多级冷却工艺,减少了热处理过程中钢管温差。

[0045] 2、本发明通过将计算机数值模拟和实际工艺布置图技术有效结合起来,综合发挥计算机数值模拟在仿真预测方面的优势,以实现钢管连续感应淬火工艺设计的优化,以优化后的工艺参数控制钢管连续感应淬火过程,减少了通过试制确定工艺参数所造成的能源消耗,提高了工作效率。

## 附图说明

[0046] 图1为本发明实施例采用的钢管连续感应淬火成套工艺平面布置示意图;

[0047] 图2为本发明实施例中喷雾冷却室结构示意图;

[0048] 图3为本发明控制方法的流程示意图;

[0049] 图4为钢管对称模型示意图;

[0050] 图5为感应线圈组对称模型示意图;

[0051] 图6为钢管横截面模型示意图;

[0052] 图7为钢管感应加热过程内外表面温度示意图;

[0053] 图8为钢管感应加热后横截面自内向外温度分布示意图;

[0054] 图9为钢管感应加热后空冷1秒后横截面自内向外温度分布示意图;

[0055] 图10为0.3MPa喷水压力下钢管横截面沿径向各位置组织分布示意图;

[0056] 图11为0.5MPa喷水压力下钢管横截面沿径向各位置组织分布示意图。

[0057] 图中:1、前矫直牵引机,2、感应加热器组,3、托辊,4、钢管,5、空冷段,6、第一喷射淬火冷却室,7、第二喷射淬火冷却室,8、中频电源控制柜,9、低频电源控制柜,10、喷嘴,11、淬火冷却室外壁。

## 具体实施方式

[0058] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。本实施例以本发明技术方案为前提进行实施,给出了详细的实施方式和具体的操作过程,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0059] 如图1和图2所示,本发明实施例采用的钢管连续感应淬火成套装置包括依次连接的前矫直牵引机1、感应加热器组2和喷射淬火冷却室。感应加热器组2为14组相互独立的感应加热炉,前10组为低频加热段,由两个低频电源控制柜9进行控制;后4组为中频加热段,由两个中频电源控制柜8控制。每组感应加热器之间装配有一个双锥体V型托辊3,托辊母线夹角为135°。每组感应加热器由10个结构相同的线圈构成,线圈截面为矩形,宽22mm、高20mm、厚4.5mm,线圈组内径305mm,每个线圈间距30mm。每组感应器实际有效作用长度750mm,间距950mm。

[0060] 感应加热器组2与喷射淬火冷却室之间有一段空冷段5。

[0061] 淬火过程采用两段喷射淬火冷却室分布,包括相连接的第一喷射淬火冷却室6和第二喷射淬火冷却室7,每个喷射淬火冷却室由12只喷射压力可调的喷枪沿周向排布成喷圈。

[0062] 钢管连续淬火过程具体为:12m长的无缝钢管材质为35CrMo,外径139.7mm,壁厚7.72mm,钢管4以一定线速度在托辊上直线运动,经前矫直牵引机牵引拉动,进入感应器组中进行奥氏体化;加热结束后空冷段自然冷却,温差减小至合理范围之内,完成钢管连续感应加热过程;钢管进入喷射淬火冷却室,喷射淬火冷却室由周向布置的喷嘴10构成喷圈,淬火冷却室外壁11轮廓截面为正六边形,对奥氏体化后的钢管在高压水雾中快速冷却至Ms点以下,形成马氏体或贝氏体组织,完成钢管淬火冷却过程。

[0063] 如图3所示,本发明实施例提供的基于数值模拟的钢管连续淬火过程控制方法,包括以下步骤:

[0064] 步骤一、根据钢管移动线速度和淬火冷却喷水压力,计算连续感应淬火过程初始的工艺参数,包括加热过程工艺参数和淬火过程工艺参数。加热过程工艺参数包括加热时间、空冷时间以及线圈励磁电流和频率;淬火过程工艺参数包括淬火冷却时间和钢管与淬火介质之间的换热系数。

[0065] 本实施例中,钢管线速度取300mm/s,则每组感应炉加热时间为2.5s,间隔冷却时间为3.17s。1-10组感应炉工作电流为4750A,感应频率为500Hz;11-14组感应炉工作电流为6350A,感应频率为800Hz。冷却过程为:第一次和第二次喷水时间均为4s,两次喷水间隔为2s。实际设备淬火只有2次喷水和中间的一次空冷。但考虑在离开淬火设备段后,钢管仍可能发生部分相变,导致最终组织与刚离开淬火段的组织并不一致。因而补充一段空冷,时间设定为2分钟,以便于计算确定最终的组织分布。

[0066] 步骤二、对钢管连续感应加热过程进行有限元分析,获得加热过程工艺参数与钢管内外表面温度之间的关系,如图7-9所示,图7为加热过程内外表面温度随时间变化图,图8为加热过程结束后内外表面温度分布图,图9为经过1s空冷后内外表面温度分布图。

[0067] 本实施例采用商用Flux软件进行模拟,具体如下:

[0068] 201)建立钢管、感应线圈和空气的几何模型。感应线圈与钢管都具有轴对称的特

点,钢管任意横截面在通过线圈过程中都经历几乎完全一致的感应加热过程,因而将运动对象模型等效转变为静止对象进行计算,同时简化三维模型为轴对称二维模型建模。利用Flux前处理器模块进行建模或从其它建模软件中读入几何模型,如图4-图5所示。

[0069] 202)获取20-1000℃温度范围内钢管的磁导率、电阻率、导热系数、比热容和密度以及感应线圈和空气的相对磁导率。

[0070] 203)使用Flux Supervisor的Skin Depth计算钢管的集肤效应深度,根据该深度进行网格划分,划分网格时,网格密度由钢管表面向外递减。

[0071] 集肤效应深度 $\delta$ 的计算公式如下:

$$[0072] \delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu_r f}}$$

[0073] 其中, $\rho$ 为钢管的电阻率, $\mu_r$ 为钢管的相对磁导率, $f$ 为线圈励磁电流频率。

[0074] 204)设置感应加热工况,包括设定空气外边缘处磁势为零、设定线圈励磁电流及频率、设定空气和钢管间的热交换系数和辐射系数,将定义的材料赋予不同的模型区域,并根据步骤一计算的加热过程工艺参数设置加载步骤。

[0075] 205)进行网格检查和物理检查,判断是否存在错误,若是,则提示错误信息,并排除,若否,则开始执行计算机有限元求解,执行步骤206)。

[0076] 206)保存感应加热各个阶段的温度随时间变化情况及钢管外表面和内表面温差随时间变化情况。

[0077] 步骤三、对钢管淬火冷却过程进行有限元分析,获得淬火过程工艺参数与钢管组织分布情况之间的关系,如图10-11所示,图10为0.3MPa水压喷水淬火冷却结束后,钢管横截面沿径向各位置组织分布图,图11为0.5MPa水压喷水淬火冷却结束后,钢管横截面沿径向各位置组织分布图。

[0078] 本实施例采用MSC.MARC软件及其相变子程序进行模拟,具体如下:

[0079] 301)建立淬火冷却过程的钢管模型。考虑到实际淬火过程中,钢管在生产线上匀速运动,沿长度方向,各个位置的淬火情况近似完全一致,因而可对计算模型进行适当的简化,仅取钢管横截面(长度1mm)作为计算模型,如图6所示。

[0080] 302)采用六面体八节点单元进行网格划分。

[0081] 303)获取20-1000℃温度范围内钢管的比热、热导率、相变焓和相变动力学参数(TTT曲线)。

[0082] 304)设定淬火过程的边界条件。其中外表面受喷水或空气换热作用,按第三类边界条件设定钢管与淬火介质之间的换热系数;内表面仅受空气换热作用,按第三类边界条件设定钢管与空气之间的换热系数。

[0083] 305)根据步骤一计算的淬火过程工艺参数设置淬火冷却加载步骤,设置钢管的初始温度为900℃。

[0084] 306)进行网格检查和物理检查,判断是否存在错误,若是,则提示错误信息,若否,则开始执行计算机有限元求解,执行步骤307);

[0085] 307)保存淬火冷却过程中温度随时间的变化情况及钢管淬火结束后的组织分布情况。

[0086] 步骤四、根据工艺控制要求和步骤二、三的结果,获取符合工艺控制要求的加热过

程工艺参数和淬火过程工艺参数,形成最终的钢管连续感应淬火过程控制参数。

[0087] 工艺控制要求为:加热过程中钢管内外表面的温差达到设定范围且钢管淬火后的组织分布达到设定范围。如本实施例中,要求加热结束时外表面880~950℃,内表830~900℃,经空冷段5后,钢管内外表面温差不高于5℃。

[0088] 步骤五、以步骤四获得的控制参数控制实际钢管连续淬火过程。

[0089] 由图7~9可得,加热结束后,内外表面温差达到16.4℃,经1s空冷后,温差降为6.87℃,达到所需求求。将此时间换算成空冷段的辊道长度为300mm,考虑到计算误差以及安全因素,建议设置的辊道长度应取300mm的2倍以上。

[0090] 由图10和图11可知,喷水水压直接改变了淬火的效果,如水压为0.3MPa,最终组织基本为贝氏体,而增加水压至0.5MPa,则最终组织为马氏体。因此,如需要钢管的最终淬火组织为贝氏体,则需要设定较小(0.3MPa)的喷水水压;相应的,如需要最终淬火组织为马氏体,则需要采用较大(0.5MPa)的喷水水压。

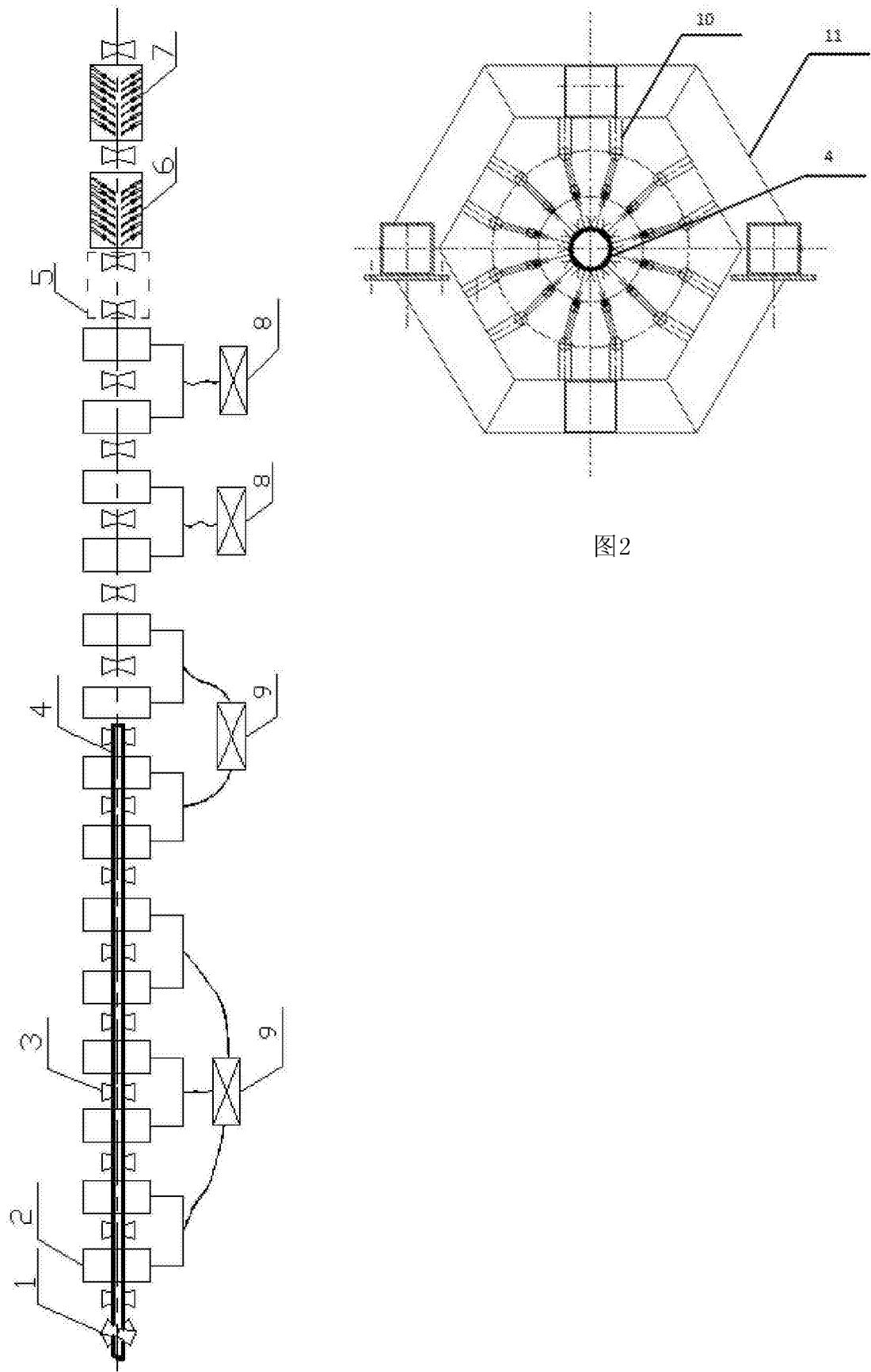


图1

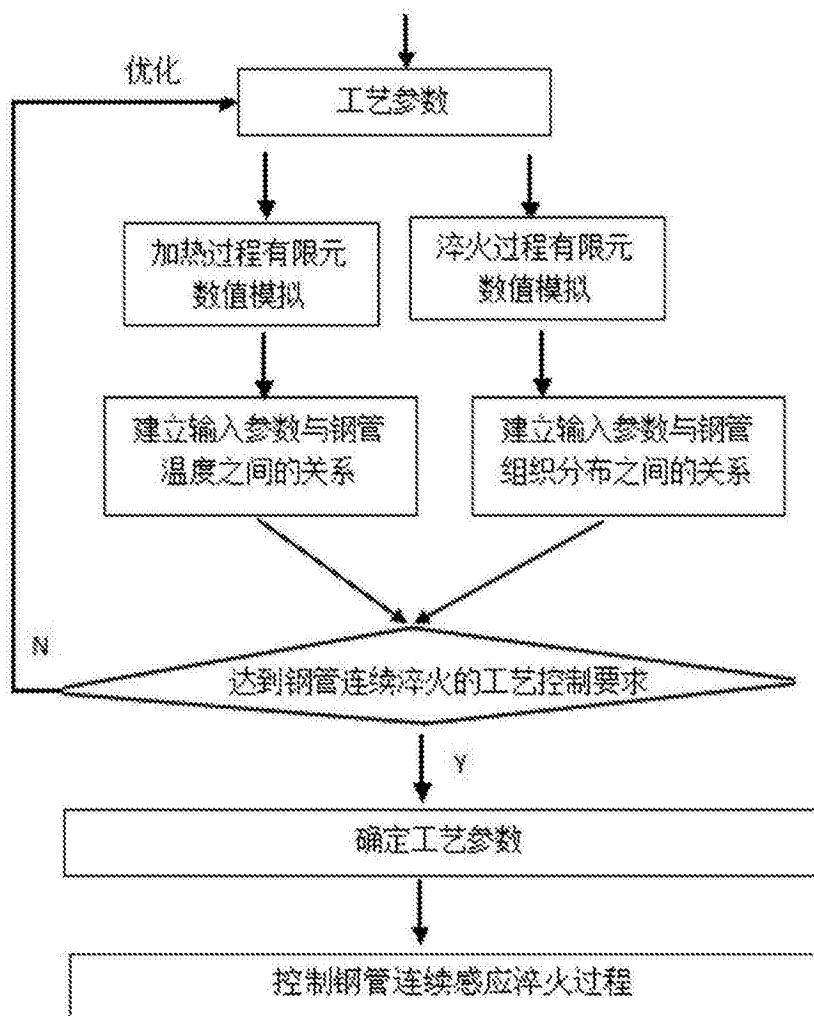


图3



图4

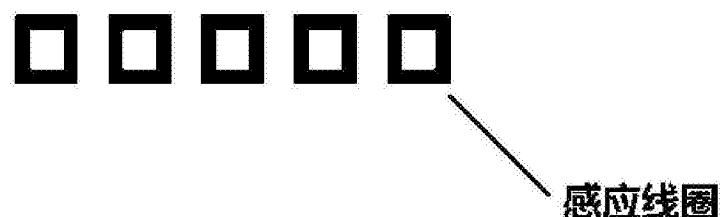


图5

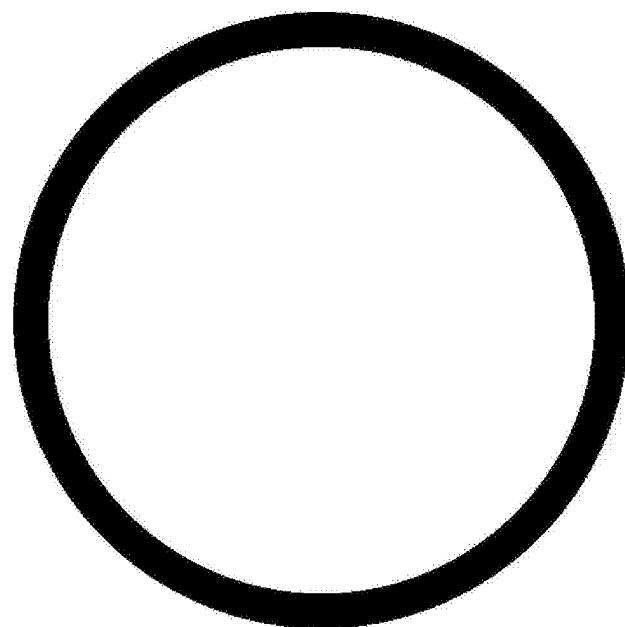


图6

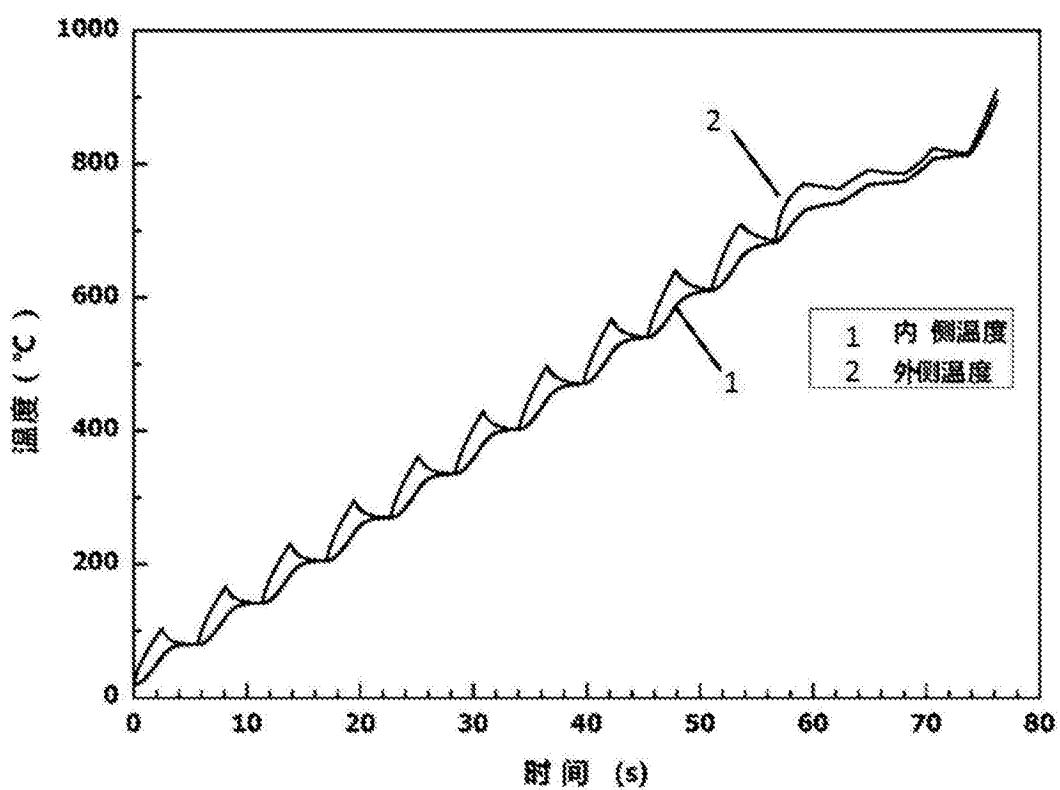


图7

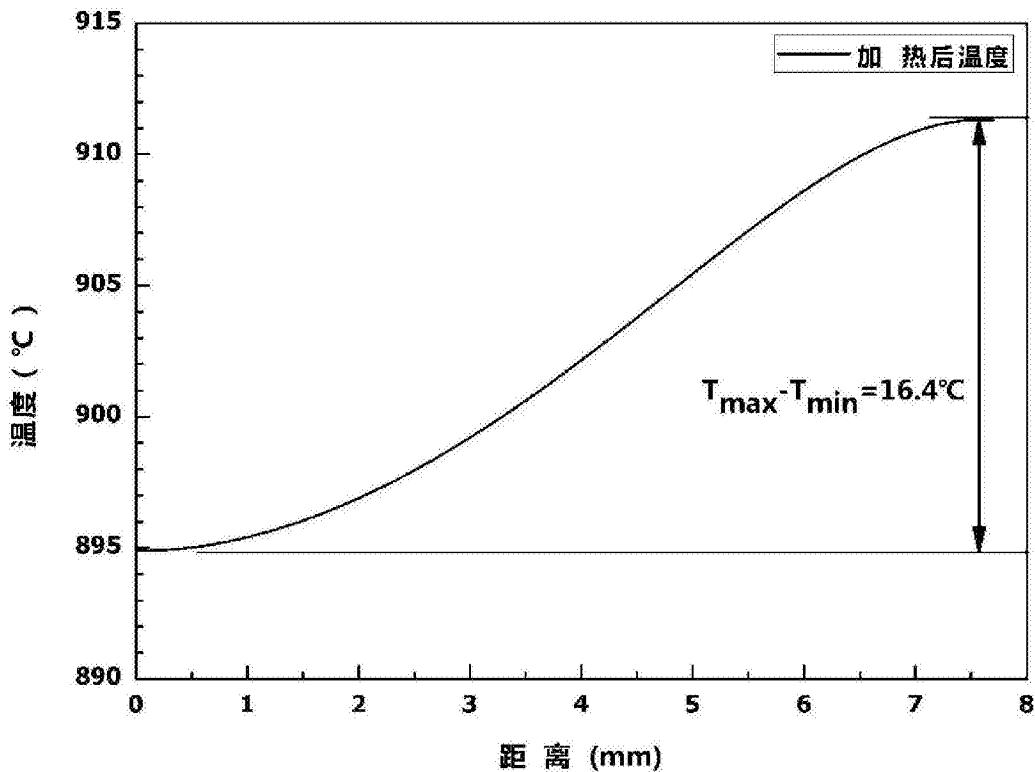


图8

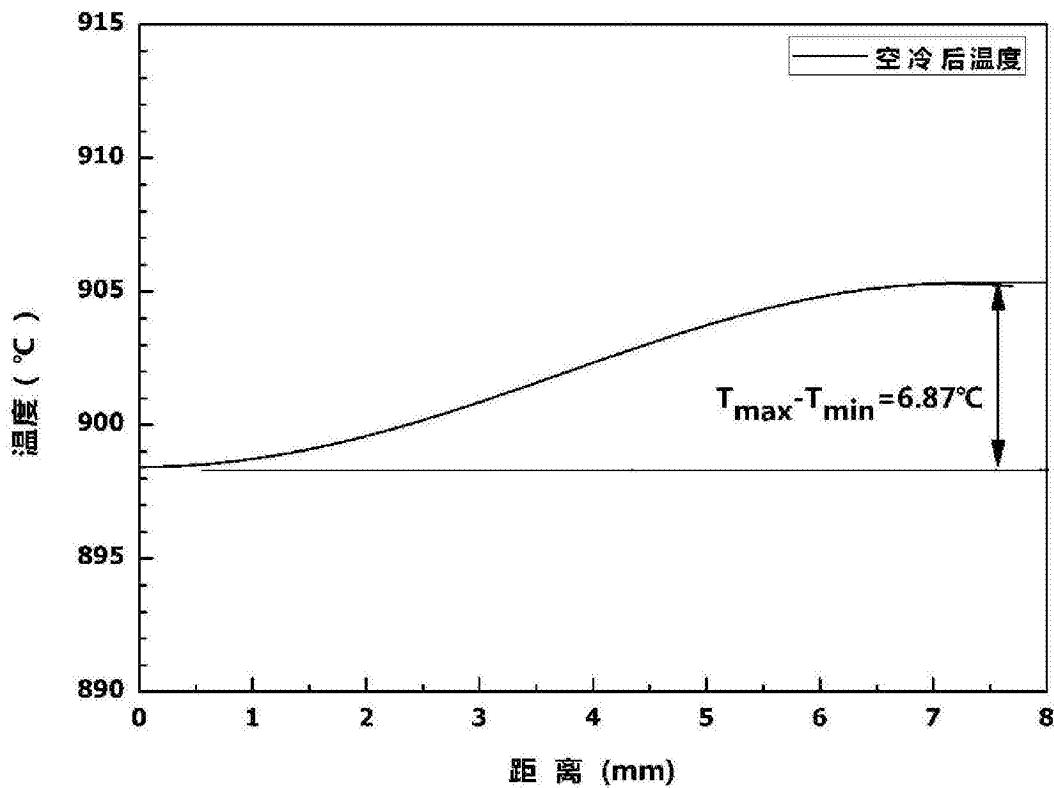


图9

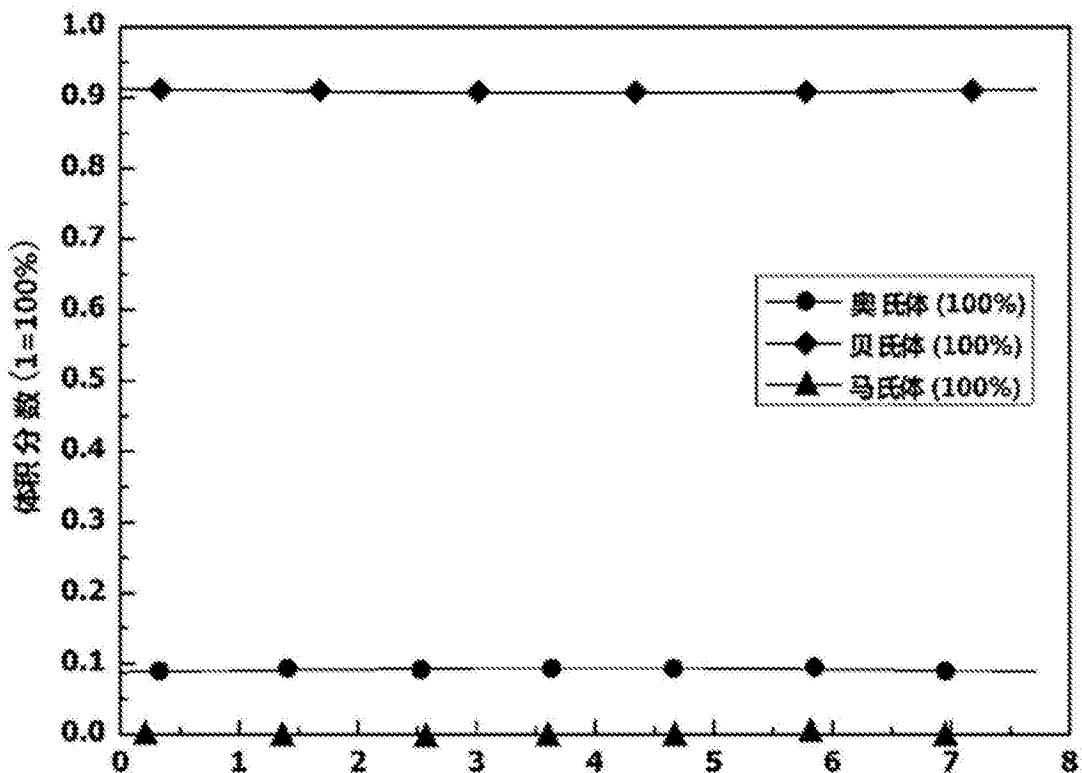


图10

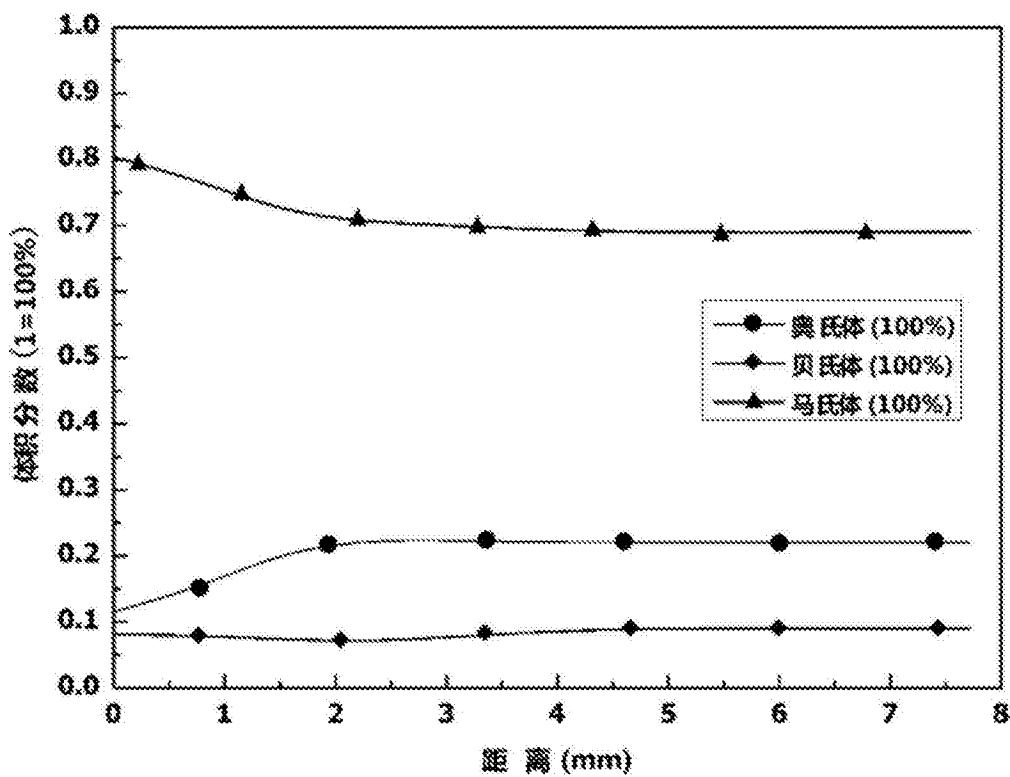


图11