



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102734603 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 17

(21) 申请号 201110266878. 6

(22) 申请日 2011. 09. 09

(30) 优先权数据

10-2011-0028810 2011. 03. 30 KR

(71) 申请人 韩国地域暖房公社

地址 韩国京畿道

(72) 发明人 李勋 林钟元 高贤溢 赵钟斗  
金周勇

(74) 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司 11283

代理人 李翔 桑传标

(51) Int. Cl.

F16L 59/14 (2006. 01)

F24D 19/00 (2006. 01)

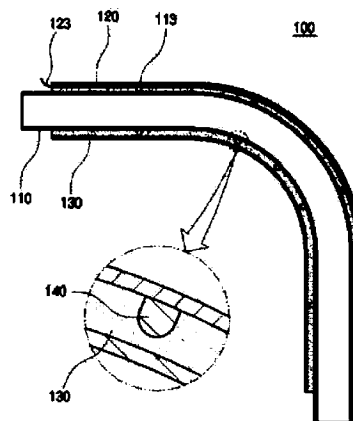
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 7 页

## (54) 发明名称

集中供暖热排管用异形管及其制造方法

## (57) 摘要

本发明关于一种具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管及其制造方法,具体说明为,该异形管包括:内管、外管、保温材料和剪切应力控制环;其中,所述内管以一定曲率弯曲,两端与集中供暖热排管连接,内部有中温水流动;所述外管的直径大于上述内管直径,内部形成空间部,使内管能够插入到内部;所述保温材料填充在内管和外管之间的空间部;所述剪切应力控制环与上述内管的弯曲部结合,本发明在以一定曲率弯曲的异形管的内管弯曲部设置了剪切应力控制环,能够分散保温材料受到的剪切应力,防止热排管发生变形。



1. 一种集中供暖热排管用异形管,其特征在于,该异形管包括:内管、外管、保温材料和剪切应力控制环;其中,所述内管以一定曲率弯曲,所述内管的两端与集中供暖热排管连接,所述内管的内部有中温水流动;所述外管的直径大于所述内管的直径,所述外管的内部形成有空间部,使所述内管能够插入到所述外管的内部;所述保温材料填充在所述内管和所述外管之间的空间部;所述剪切应力控制环与所述内管的弯曲部结合。

2. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,在所述内管和所述外管之间还设置有垫圈,该垫圈在组装时保持所述空间部。

3. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,在所述内管和所述外管之间还沿长度方向设置有通过保温材料固定的漏水感应线。

4. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,所述剪切应力控制环由金属材料制成,所述剪切应力控制环具有能够压入所述内管的内径,并且同时设置有N个所述剪切应力控制环。

5. 权利要求4所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,N为奇数。

6. 权利要求5所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,在所述内管的弯曲部设置1个剪切应力控制环时,将所述剪切应力控制环设置在所述弯曲部的中心线(C1)上。

7. 权利要求5所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,在所述内管的弯曲部设置3个以上的剪切应力控制环时,将其中1个设置在弯曲部的中心线(C1)上,其余的剪切应力控制环以从所述弯曲部的中心线(C1)延伸的任意一个基准点(P1)为中心,向两侧以相同角度分别设置。

8. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,所述剪切应力控制环的高度控制为不与所述外管的内表面接触的高度。

9. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管,其特征在于,所述剪切应力控制环通过钨极氩弧焊与所述内管的弯曲部结合。

10. 权利要求1所述的集中供暖热排管用异形管的制造方法,其特征在于,该制造方法包括:剪切应力控制环制造工序、焊接工序、组装工序和保温材料发泡工序;其中,在所述剪切应力控制环制造工序中,利用切割机切割中空的金属管或金属板,制作剪切应力控制环,该剪切应力控制环的直径能够压入到所述内管的外侧;在所述焊接工序中,在将制作完成的所述剪切应力控制环压入到所述内管的弯曲部后,通过钨极氩弧焊进行焊接;在所述组装工序中,在将结合了所述剪切应力控制环的所述内管插入到所述外管后进行组装;在所述保温材料发泡工序中,在所述外管和所述内管之间填充保温材料并进行发泡。

11. 权利要求10所述的集中供暖热排管用异形管的制造方法,其特征在于,在所述焊接工序中,在焊接所述剪切应力控制环后,还进行非破坏性的渗透探伤检测。

## 集中供暖热排管用异形管及其制造方法

### 技术领域

[0001] 本发明关于具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管,具体说明为,所涉及的集中供暖热排管用异形管具有设置在以曲线弯曲的热排管的内管曲线部的、分散保温材料受到的剪切应力的剪切应力控制环(SCR, Shear Control Ring)。

### 背景技术

[0002] 集中供暖系统是 20 世纪 20 年代在欧洲首先开发的,其目的是缓解城市人口激增造成的大气污染以及节约能源。

[0003] 热排管指的是以集中供暖为目的而设置的输热设施,能够将供暖设施产生的集中暖房热量供给到使用者的机械室。

[0004] 关于集中供暖用热排管的材料,在集中供暖系统开发初期的 20 世纪 20 年代,主要采用了钢筋混凝土管道,因此保温效果差,缺乏实效性。进入 20 世纪 60 年代,成功研发了工厂制作保温管,使集中供暖系统迅速发展,普及到世界各地。

[0005] 目前,国内使用的热排管并非单一的保温管,而是双层保温管。一般说的热排管指的是埋设在地下的热排管,考虑到绝热性、经济性等原因,普遍使用了双层保温管。

[0006] 图 1 是现有技术的双层保温管的结构示意图,其组成包括:钢材制成的内管 1;聚氨酯等保温材料 3;钢材或合成树脂制成的外管 5;漏水感应线 7。

[0007] 从 80 年代初,国内首次引进集中供暖事业以来,在很短的期间内集中供暖事业无论从数量还是质量上都取得了飞速成长。这段时期内,工业化带来的人口向城市集中导致的住宅问题以及针对能源使用量增加提出的能源使用效率问题逐渐凸显出来,为扩大集中供暖事业普及面,带来了重大机遇。

[0008] 但是,世界上还没有针对热排管技术领域形成正确的标准。加之,韩国仍然以传统的火炕取暖等简易暖房为主,集中供暖水的温度变化幅度较大,因此,热排管在运营阶段遇到了很多困难。

[0009] 在流经钢管内部的中温水的温度及压力造成的膨胀作用力以及外管和土沙之间的摩擦力及反作用力等负荷作用下,埋设在地下的热排管容易在弯曲末端发生横向形变。

[0010] 特别是,热排管的装配部件中的以一定曲率弯曲的异形管,由于其形状的原因,在出现热膨胀时,结构相对比较脆弱的部位在作用力及变形集中时容易破损。为防止所述现象,如图 2a 及图 2b 所示,在异形管的外管 5 上设置了伸缩缓冲材料(泡沫垫, Foam pad)8 或导管 9。

[0011] 但是,所述伸缩缓冲材料在经过一段时间后,会因为热膨胀力和地面反作用力而压缩变形,丧失原有功能,导致热排管使用寿命缩短、结构不稳定、排管破损等问题。另外,埋设在地下的热排管需要根据地形或设置障碍物的情形进行排管,因此,很大程度上受到空间的限制。因此,可能降低设置导管的实用性。

[0012] 为解决所述问题,正着手开发无需使用伸缩缓冲材料和导管、本身就对热膨胀具有稳定结构的热排管。

## 发明内容

[0013] 本发明为满足上述要求而提出,其目的是,提供一种具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管,其中,在以一定曲率弯曲的异形管的内管弯曲部设置有用于分散保温材料受到的剪切应力的剪切应力控制环。

[0014] 为达到上述目的,本发明提供一种具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管,其组成包括:内管、外管、保温材料和剪切应力控制环,其中,所述内管以一定曲率弯曲,两端与集中供暖热排管连接,内部有中温水流动;所述外管的直径大于所述内管直径,内部形成有空间部,使内管能够插入到内部;所述保温材料填充在内管和外管之间的空间部;剪切应力控制环与所述内管的弯曲部结合。

[0015] 根据本发明,所述内管和外管之间还设置有垫圈,在组装时保持所述空间部。

[0016] 根据本发明,所述内管和外管之间还沿长度方向设置有通过保温材料固定的漏水感应线。

[0017] 根据本发明,所述剪切应力控制环由金属材料制成,所述剪切应力控制环具有能够压入所述内管的内径,并且同时设置有N个。

[0018] 根据本发明,其中,N为奇数。

[0019] 根据本发明,在内管的弯曲部设置1个剪切应力控制环时,将其设置在弯曲部的中心线(C1)上。

[0020] 根据本发明,在所述内管的弯曲部设置3个以上的剪切应力控制环时,将其中1个设置在弯曲部的中心线(C1)上,其余以从所述弯曲部的中心线(C1)延伸的任意一个基准点(P1)为中心,向两侧以相同角度分别设置。

[0021] 根据本发明,所述剪切应力控制环的高度控制在不与所述外管的内表面接触。

[0022] 根据本发明,所述剪切应力控制环通过钨极氩弧焊(티그용접)与所述内管的弯曲部结合。

[0023] 本发明还提供一种具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管的制造方法,该方法包括:剪切应力控制环制造工序、焊接工序、组装工序和保温材料发泡工序;其中,在所述剪切应力控制环制造工序中,利用切割机切割中空的金属管或金属板,制作剪切应力控制环,其直径应保证能够压入到内管外侧;在所述焊接工序中,在将所述制作完成的剪切应力控制环压入到所述内管的弯曲部后,通过钨极氩弧焊进行焊接;在所述组装工序中,在将所述结合了剪切应力控制环的内管插入到外管后进行组装;在所述保温材料发泡工序中,在所述外管和内管之间填充保温材料并进行发泡。

[0024] 所述焊接工序中,在焊接了剪切应力控制环后,还要进行非破坏性的渗透探伤检测。

[0025] 本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管,在以一定曲率弯曲的异形管的内管弯曲部设置了剪切应力控制环,能够分散保温材料受到的剪切应力,防止热排管发生变形。

## 附图说明

[0026] 图1是现有技术的热排管结构示意图;

- [0027] 图 2a 及图 2b 是现有技术的热排管用异形管结构示意图；
- [0028] 图 3 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管结构示意图；
- [0029] 图 4 是图 3 的剖视图；
- [0030] 图 5a 及图 5b 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管中内管结构侧视图；
- [0031] 图 6 是为设计本发明的剪切应力控制环而绘制的异形管内设置障碍物 (dam) 与否对应的曲线流路内流体流动状态示意图；
- [0032] 图 7 是本发明的剪切应力控制环使用前后保温材料剪切应力分布情形对比图；
- [0033] 图 8 是包含剪切应力控制环的弯曲部的模拟示意图；
- [0034] 图 9 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管制造流程示意图。
- [0035] 附图标记
- [0036] 110 : 内管                      111 : 弯曲部
- [0037] 113 : 垫圈                      120 : 外管
- [0038] 121 : 空间部                    123 : 漏水感应线
- [0039] 130 : 保温材料                140 : 剪切应力控制环。

### 具体实施方式

[0040] 下面参照附图对本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管进行详细说明。

[0041] 在下面的说明中, 为避免混淆本发明技术思想, 对于众所周知的相关功能或结构将省去详细说明。此外, 下面用到的用语是在本发明的功能基础上定义的, 可能会因为使用者的意图或习惯而有所不同。因此, 其定义应以本说明书整体内容为基础进行理解。

[0042] 图 3 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管结构示意图, 图 4 是图 3 的剖视图, 图 5a 及图 5b 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管中内管结构侧视图。

[0043] 如图 3 至图 5b 所示, 本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管 100 包括内管 110、外管 120、保温材料 130、剪切应力控制环 140。

[0044] 首先, 内管 110 由金属材料制成, 内管 110 以一定曲率弯曲构成弯曲部 111, 内管 110 的两端与集中供暖热排管 (没有图示) 连接, 内部流过中温水。一般, 优选地, 在内管 110 的外表面还设置多个垫圈 113。

[0045] 外管 120 由金属或合成树脂材料制成, 直径大于内管 110 直径, 以保证内管 110 插入时, 内部具有空间部 121。内管 110 插入到内部中央部后, 通过垫圈 113 保持间隔。外管 120 还在其内部沿长度方向设置了通过保温材料 130 固定的漏水感应线 123。

[0046] 保温材料 130 采用的是聚氨酯, 填充在内管 110 的外表面和外管 120 的内表面之间形成的空间部 121 中。

[0047] 剪切应力控制环 140 采用与内管 110 相同或不同材质的金属制成, 插入到内管 110 的弯曲部 111, 剪切应力控制环 140 通过钨极氩弧焊结合, 共设置有 N 个 (N 为奇数), 剪切应力控制环 140 的内径允许内管 110 压入。如图 5a 所示, 在内管 110 的弯曲部 111 设置 1

个剪切应力控制环 140 时,将其设置在弯曲部 111 的中心线 C1 上。如果如图 5b 所示,在内管 110 的弯曲部 111 设置 3 个以上的剪切应力控制环 140 时,将其中 1 个设置在弯曲部 111 的中心线 C1 上,其余以从所述弯曲部 111 的中心线 C1 延伸的任意一个基准点 P1 为中心,向两侧以相同角度  $\theta$  分别设置。另外,优选地,剪切应力控制环 140 的高度控制在不与外管 120 的内表面接触。

[0048] 下面参照附图对本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管进行详细说明。

[0049] 为了使本发明的剪切应力控制环的结构设计出最佳结构而进行了研究。

[0050] 首先,对采用剪切应力控制环减小保温材料发生的最大剪切应力的基本原理进行了图示,并通过田口方法 (Taguchi method) 推算出了各管径对应的最佳剪切应力控制环尺寸。

[0051] 通过剪切应力控制环改善保温材料剪断强度的基本原理如下。

[0052] 埋设在地下的热排管在流经钢管内部的中温水的温度及压力造成的膨胀作用力以及外管和土沙之间的摩擦力及反作用力等负荷作用下,容易在弯曲末端发生横向形变。在所述条件下,异形管的组成部件中结构最脆弱的部位是保温材料,为改善其剪切强度,采用了设置剪切应力控制环的异形管。

[0053] 分析负载荷重及其对应的应力或位移的结构力学分析方法和分析流体流动及其对应的压力和速度的流体力学分析方法,虽然其研究对象分别为刚体和流体,但在一定条件下,都遵循能量总和保持不变的物理规律。

[0054] 从所述观点出发,可以借鉴如图 6a 及图 6b 所示的曲线流路,对本发明通过使用剪切应力控制环减小保温材料受到的剪切应力的原理进行说明。图 6 是为设计本发明的剪切应力控制环而绘制的异形管内设置障碍物与否对应的曲线流路内流体流动状态示意图。

[0055] 流路内流动的流体可以是任意流体,为简化问题,假设流体在曲线区间流动足够缓慢,以致可以忽略流体自身惯性力(离心力)造成的压力集中现象,并假设流体和流路界面之间的摩擦力可以忽略。

[0056] 分别对流路内不存在任何阻碍流体流动的障碍物的情形和流路内存在阻碍流体流动的障碍物,即,设置了剪切应力控制环的情形进行分析。

[0057] 图 6a 所示为流体流经没有障碍物的曲线流路的流线(Stream line)。根据流体力学基本原理,可以认为在流路入口处的地点①和流路出口处的地点③,流体速度沿半径方向保持一定。由于不存在任何阻碍流动的障碍物,如管内带有箭头的曲线所示,流经管内部的流体,其流线在任意点都保持与流路平行。但是,由于流路形状成  $90^\circ$  弯曲,流体内任意点在流过曲线流路的时间所移动的距离互不相同。即,图 6a 中,以流过曲线流路的地点②为例,分别比较最内侧的红色流线和绿色流线以及最外侧的蓝色流线可以发现,流体速度以红色流线最慢(在曲线区间内流经距离最短),绿色、蓝色流线依次变快。当流过如地点②的任意截面的流体速度沿半径方向各不相同,即各层分别具有不同速度时,如果流体受到剪切力作用,则剪切力的大小由流体的最小流速和最大流速的差值决定。因此,如果能够减小曲线区间内流过任意截面的流体速度的最大值/最小值之间的偏差,即保证流经任意截面的流体半径速度保持一定,即可降低流体受到的剪切应力。

[0058] 图 6b 所示为在流路的曲线区间内设置阻碍流体流动的障碍物的情形。虽然由于

障碍物的设置,流动条件有所改变,在相距充分距离的前提条件下,入口处的地点①和出口处的地点③的流体速度可以看作与没有设置障碍物时的情形相同,沿半径方向保持一定流速。由于设置了障碍物,流过管内部的流线不再与流路形状保持平行,变成弯弯曲曲的形态。由于障碍物设置在管的内侧,沿半径方向越靠近管的内侧,其影响越大,随着向外侧远离,其影响逐渐减小。即,沿半径方向处于内侧的红色流线将变的最为弯曲,随着向外侧远离,将逐渐保持原有的流线形状。由于流线的长度与流体速度成正比,受到设置障碍物的影响,流路曲线区间内处于半径方向内侧的流体,其速度将上升。即,对于图 6a 所示的没有障碍物的流路,在地点②,沿半径方向处于内侧的红色流线和处于外侧的蓝色流线的速度(流线长度)差距较大,并因此产生较大的剪切力,但对于图 6b 所示的设置障碍物的情形,地点②的红色流线的速度(流线长度)有所提高,减小了沿半径方向的速度偏差,最终减小作用在该截面的流体沿半径方向的剪切力。

[0059] 本发明的剪切应力控制环在结构上体现了上述概念,剪切应力控制环能够起到减小位于钢管和外管之间(流路)的保温材料(流体)受到的剪切力(流体速度)偏差的作用,半径方向的剪切力偏差减小,最终能够起到减小保温材料上分布的剪切应力的效果。

[0060] 图 7 是本发明的剪切应力控制环使用前后保温材料剪切应力分布情形对比图。

[0061] 图 7a 及图 7b 所示为 125A 管径的管道内设置剪切应力控制环前后保温材料最大剪切应力示意图,通过该实例可以确认剪切应力控制环的实际效果。如图 7a 所示,没有设置剪切应力控制环时,弯曲部的最大剪切应力位于半径方向的内侧(与内管的接触部分),并集中在与弯曲部弯曲形状平行的很薄的一层区域内。相反,对于设置了剪切应力控制环的图 7b 所示情形,通过设置剪切应力控制环,切断了剪切应力比较集中的流动状态,同时拓宽了分布相对较高剪切应力的区域,使剪切应力分布状态更为分散。而且,最大剪切应力出现的部位也沿半径方向向外侧,即从内管和保温材料的接触部分向剪切应力控制环和保温材料的接触部移动。

[0062] 另外,为得到剪切应力控制环的最佳设计,进行了下面的实验。

[0063] 在本发明中田口方法的目标函数是损失的最小化。首先,为利用田口方法决定产品或工序的最佳条件,选取了能够减少损失的多个因子。其次,将各个因子排列在正交表格(Orthogonal table)内,计算各等级,并将其表现为 SNR(Signal-to-Noise ratio)进行分析。根据结果,可以分析各因子对减少损失具有多大影响力,因此,最终选择的等级将成为最佳条件。具体说明为,在目前进行施工的管径中选取了 800A、400A、200A 和 125A 四种管径进行了分析。

[0064] 图 8 是包含剪切应力控制环的弯曲部详细立体示意图。

[0065] 为利用田口方法找到剪切应力控制环的最佳形状,选取剪切应力控制环的数量 A、高度 B、厚度 C 为待分析因子,分 3 个等级(Level)进行分析。图 8 中图示了选取形状的实例,并在表 1 中整理了选取因子的定义以及不同等级对应的数值。各因子的不同等级对应的数值,是考虑了以往热排管的尺寸条件内实际能够设置的数值而选定的。例如,剪切应力控制环的高度是考虑不同管径的外管的形状和大小的限制而决定的。

[0066] 【表 1】

[0067]

管径	因子	定义	等级		
			1	2	3
800A	A	数量 (个)	1	3	5
	B	高度 (mm)	20	25	30
	C	厚度 (mm)	50	60	70
400A	A	数量 (个)	1	3	5
	B	高度 (mm)	20	25	30
	C	厚度 (mm)	25	30	35
200A	A	数量 (个)	1	3	5
	B	高度 (mm)	12	15.5	19
	C	厚度 (mm)	20	25	30
125A	A	数量 (个)	1	3	5
	B	高度 (mm)	10.5	14.0	17.5
	C	厚度 (mm)	15.0	20.0	25.0

[0068] 所述各管径对应的所有可能的组合共有 27 个, 所需自由度为 2, 由于田口方法中可用的直角坐标具有局限性, 选取了能够排列 4 个因子的  $L_8(3^4)$  直角坐标, 排列了 3 个因子 A、B、C, 其它以 e (Empty) 进行处理。本发明只考虑单一因子的影响, 不考虑各因子间的相互影响。

[0069] 实验结果表明, 对于所有管径, 选取的所有因子都随着个数及大小的增加而向着效果增大的方向移动, 对于所有管径, 选取的因子中对减小保温材料的最大剪切应力影响最大的因素是剪切应力控制环的数量。对于不同的管径, 高度和厚度的贡献略有差异, 这主要是因为决定因子的等级时, 是在能够实际制作的范围内选取的数值。

[0070] 下表 2 中给出了通过田口方法得到的剪切应力控制环的最终指标。

[0071] 【表 2】

[0072]



管径	数量、A (个)	高度、B (mm)	厚度、C (mm)
800A	5	30	70
400A	5	30	35
200A	5	19	30
125A	5	17.5	25

[0073] 下表 3 中整理了目前使用泡沫垫的指标以及使用本发明的最佳剪切应力控制环指标时的最大剪切应力和改善率。使用剪切应力控制环,预期能够使保温材料最大剪切应力相比从前减少 20% -40%。

[0074] 【表 3】

[0075]

管径	PUR 剪切应力 (MPa)		改善率 (%)
	使用泡沫垫的 指标	代替泡沫垫使用 剪切应力控制环的指标	
800A	0.36	0.22	- 38.9
400A	0.22	0.16	- 27.3
200A	0.19	0.14	- 26.3
125A	0.13	0.10	- 23.1

[0076] 下面参照附图对本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管制造过程进行详细说明。

[0077] 图 9 是本发明的具有剪切应力控制环的集中供暖热排管用异形管制造流程示意图。

[0078] 首先,利用切割机按照设计好的大小切割中空的金属管或金属板,制作剪切应力控制环 140,其直径要确保能够压入到内管 110 外侧 (S100)。

[0079] 然后,将剪切应力控制环 140 压入到所述内管 110 的弯曲部 111,通过钨极氩弧焊进行焊接 (S110)。这里,内管 110 的弯曲部 111 处于加工完成状态,在结合剪切应力控制环 140 后,进行非破坏性的渗透探伤检测,确认是否存在漏水现象。

[0080] 接着,将结合了剪切应力控制环 140 的内管 110 插入到外管 120 后进行组装 (S120)。这里,外管 120 处于以弯曲形态加工完成状态,能够插入内管 110,内管 110 内设置了垫圈 113 和漏水感应线 123。

[0081] 最后,在所述外管 120 和内管 110 之间填充保温材料 130 并进行发泡 (S130)。

[0082] 本发明可以进行多种变形,采用多种形态,所述说明仅对本发明特殊实施例进行了论述。本发明并不局限于所述说明涉及的特殊形态,在不脱离权利要求书所述的本发明的发明思想和范围的情况下,所有变形实例和等价实例以及置换实例均应属于本发明权利要求范围。

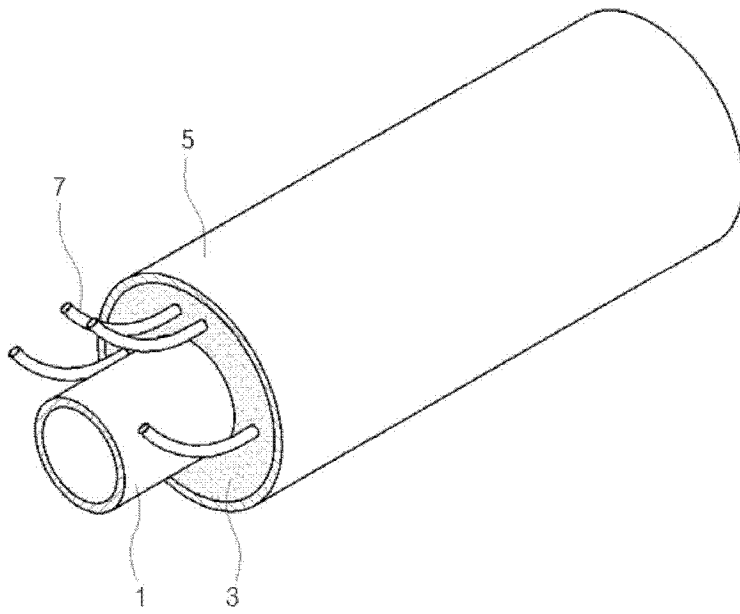


图 1

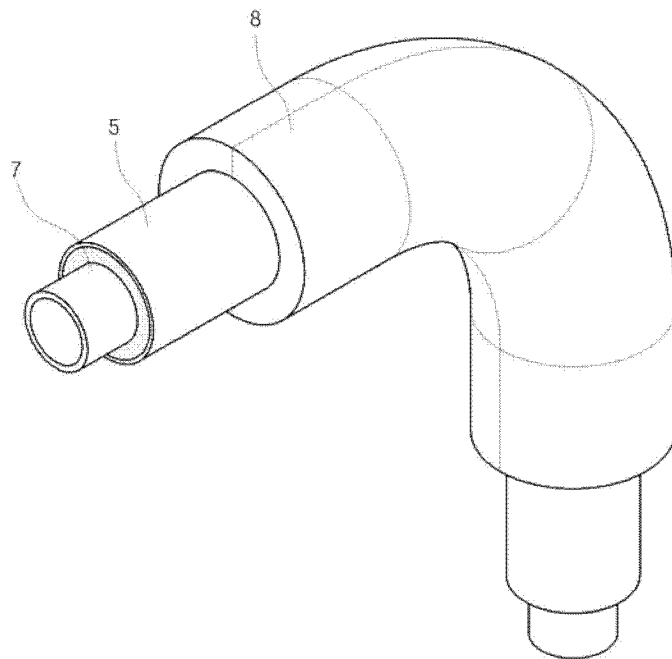


图 2a

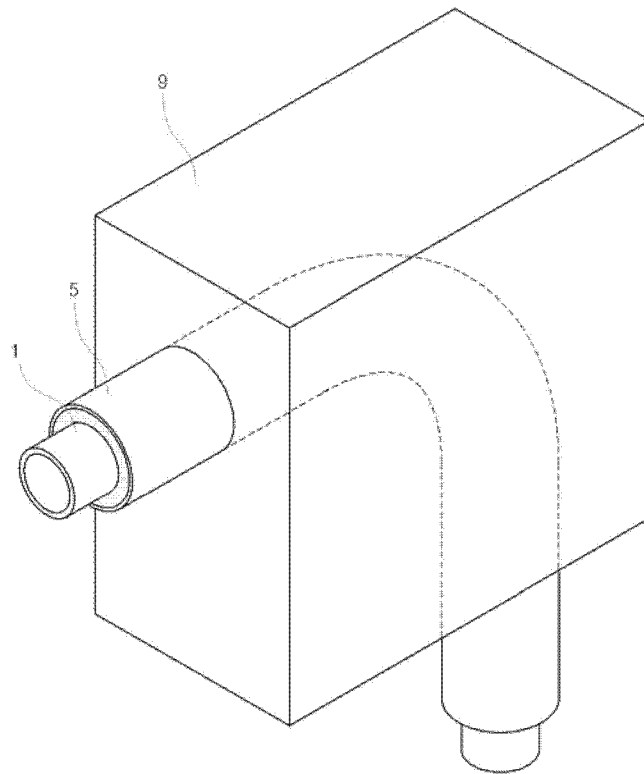


图 2b

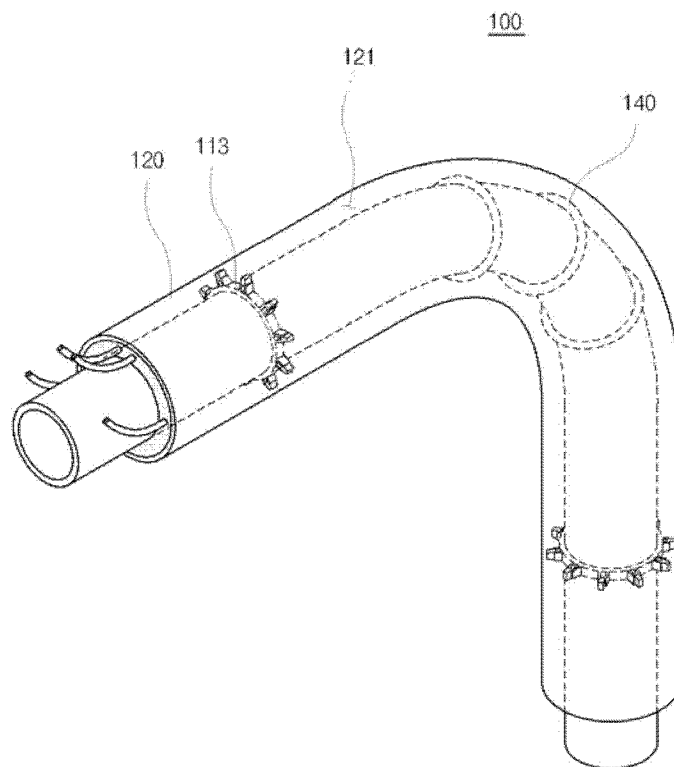


图 3

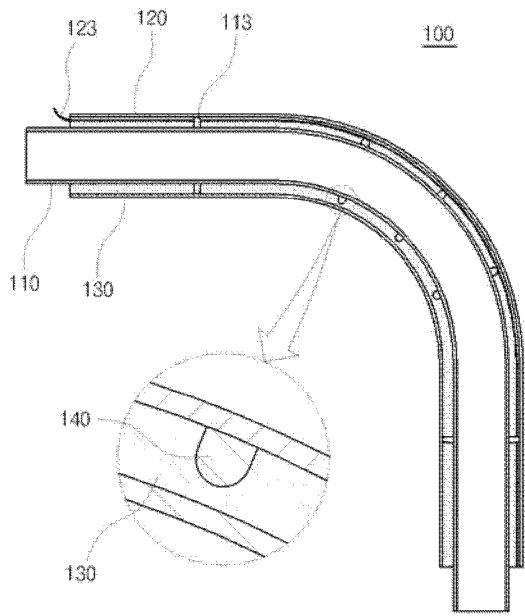


图 4

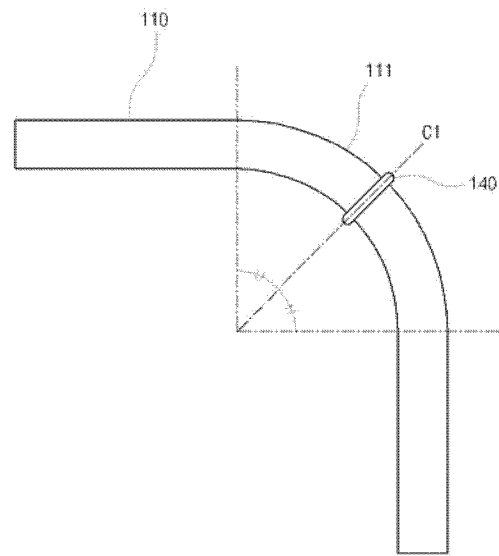


图 5a

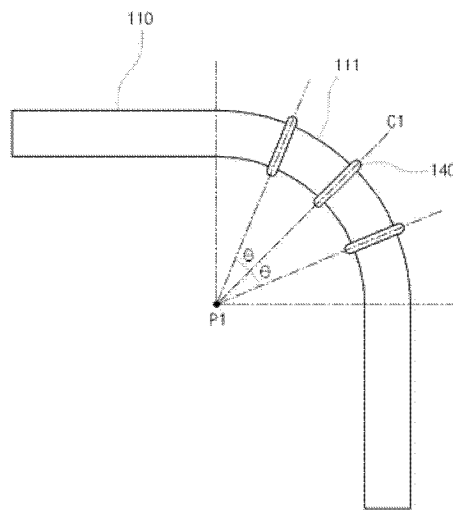
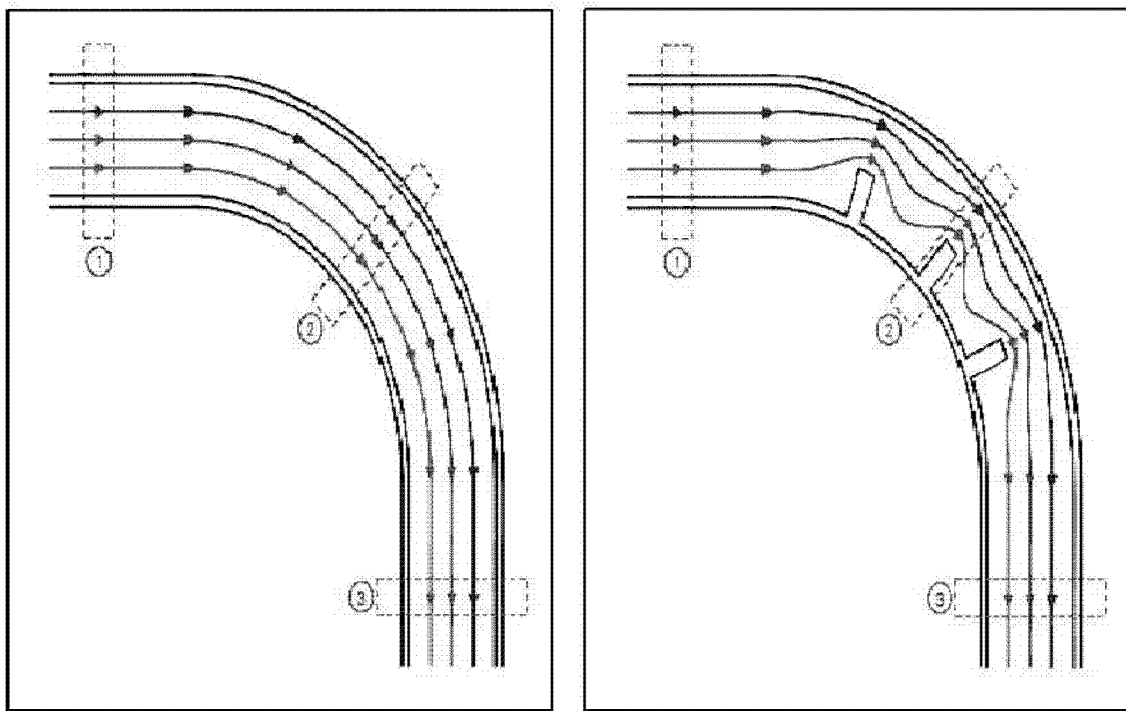


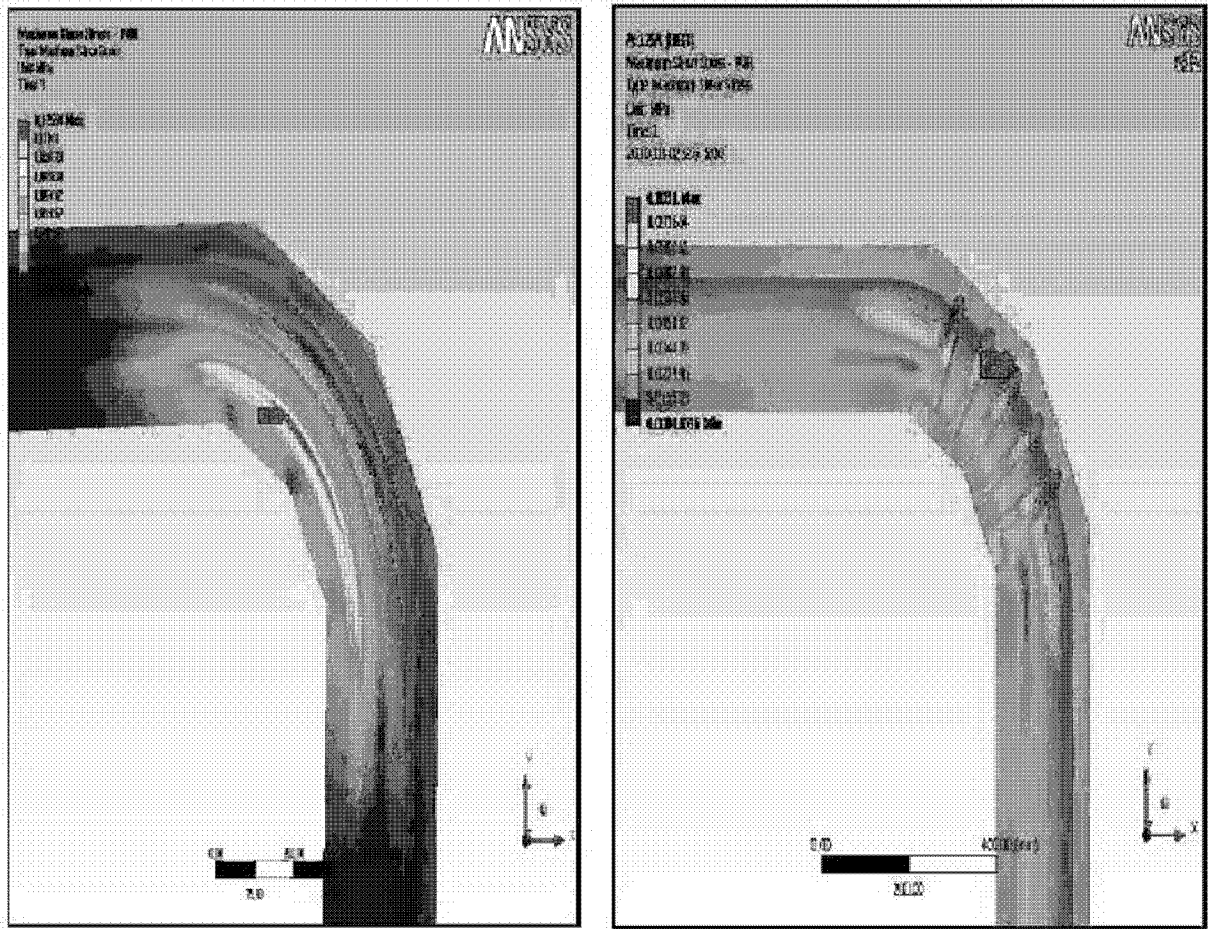
图 5b



(a) 没有障碍物 (dam) 的曲线流路

(b) 设置了障碍物 (dam) 的曲线流路

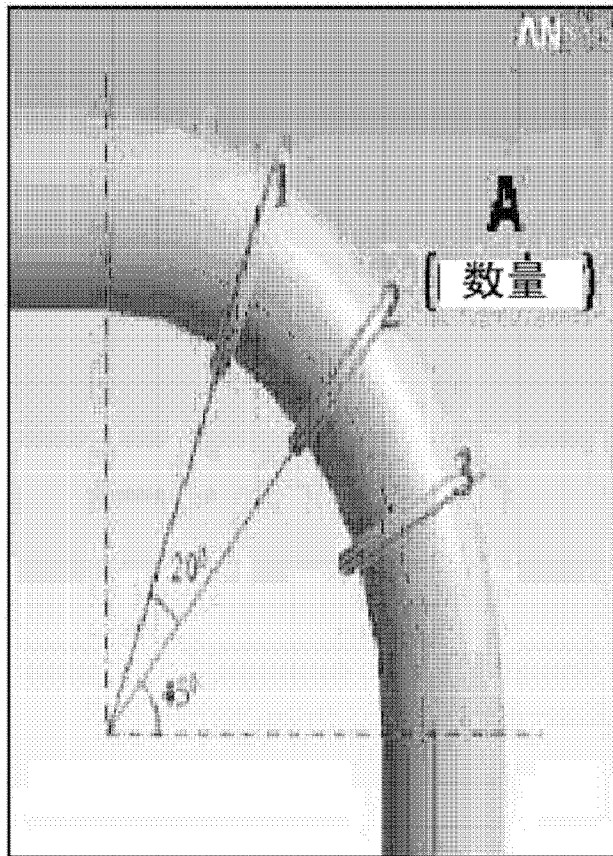
图 6



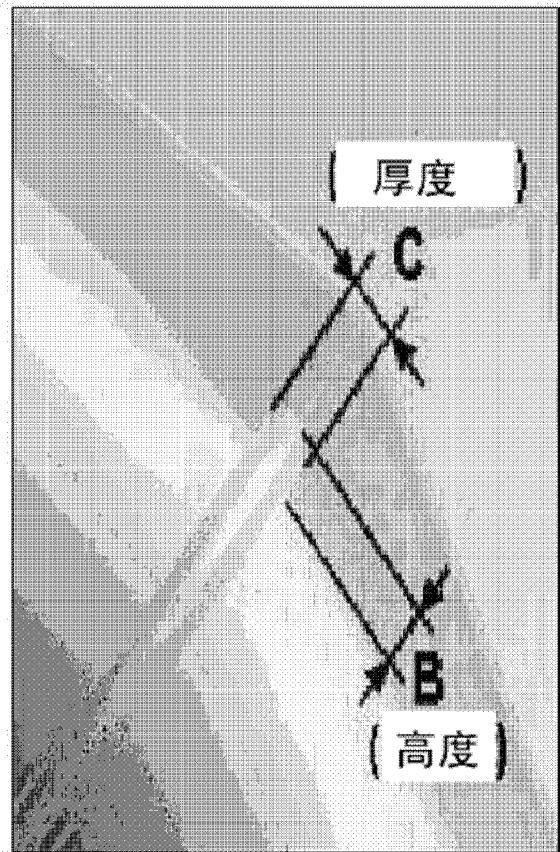
(a) 未使用剪切应力控制环

(b) 使用剪切应力控制环

图 7



(a) 数量



(b) 高度及厚度

图 8

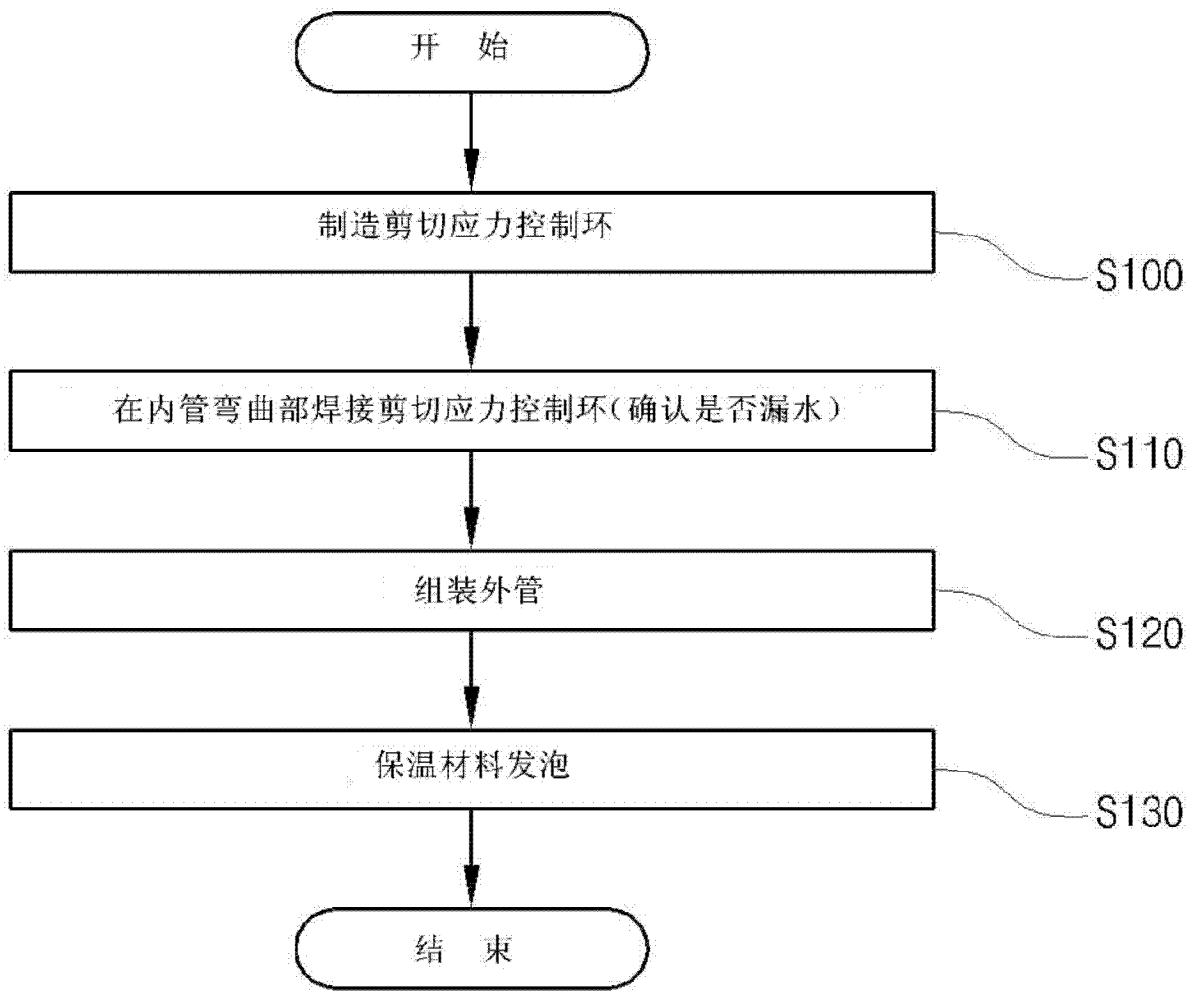


图 9