



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107252866 A

(43)申请公布日 2017. 10. 17

(21)申请号 201710426971.6

(22)申请日 2017.06.08

(71)申请人 四川理工学院

地址 643000 四川省自贡市汇东学苑街180号

(72)发明人 董定乾 孙敬鸿

(74)专利代理机构 成都九鼎天元知识产权代理有限公司 51214

代理人 吕玲

(51) Int. Cl.

B21J 5/00(2006.01)

B21J 13/02(2006.01)

B21D 37/10(2006.01)

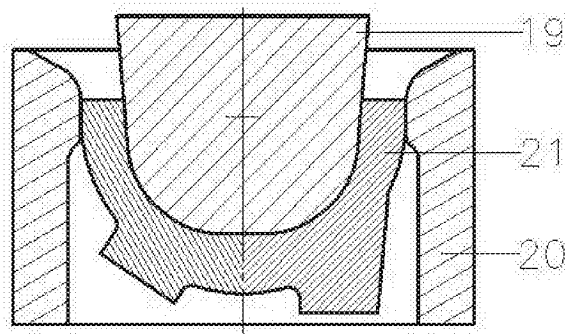
权利要求书4页 说明书9页 附图7页

## (54)发明名称

核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法

## (57)摘要

本发明属于锻件锻造技术领域,具体为核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法。该方法通过对实施钢锭切除头尾、锻粗拔长和滚圆下料等工序制备圆柱坯料,采用平砧凸模分区旋转碾压锻造方法对圆柱坯料实施胎模具成形,使中间预制板坯的管嘴形状借助胎模具以自由锻造方法充填成形。该方法能有效控制预制板坯形状及尺寸,合理分散预制板坯的金属,实现内部组织均匀、成形流线清晰以及良好的纤维组织和完整的轮廓形状。热冲压工艺变形本质属于大位移、小应变范畴,所需压力机载荷力小;热冲压整体成形易于控制大封头锻件产品形状,其成形过程中热量损耗小,坯料加热温度低、时间短,从而控制终锻成形的晶粒长大,保证产品质量。



1. 一种核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法,其特征在于包括胎模具锻造成形中间预制板毛坯工艺和封头锻件整体热冲压成形工艺。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:在进行所述胎模具锻造成形预制板毛坯工艺之前,根据核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形关键性中间预制板坯的设计方法进行设计,具体设计方法如下:

1) 采用解析方法计算获得由预制板坯到最终热冲压成形锻件时所需要的中间预制板坯的各部分设计尺寸公式;

2) 采用有限元模拟技术对上述解析方法获得的中间预制板坯设计尺寸及参数进行校验与优化,获得了设计的预制板坯关键性尺寸及参数;

3) 中间预制板坯的外伸出凸出位置管嘴坯料尺寸遵循包含原则,其凸出部位坯料体积设计时为实际锻件水嘴体积的1.1~1.2倍,并且设计轮廓形状完全包含热冲锻件的轮廓;

4) 采用有限元技术数值模拟优化预制坯料时,先对解析法确定的初始中间预制板坯进行热成形模拟并得到成形结束时工件形状,再追踪需要优化的局部位置坯料尺寸,当追踪点返回到初始状态时即可得到局部位置坯料的优化形状尺寸;

5) 采用有限元技术数值模拟优化中间预制板坯形状尺寸,在满足成形零件的形状及尺寸要求情况下,切除掉在中间预制板坯成形时的多余材料,使最终成形时坯料接触上冲头模具后外轮廓自由成形;同时,保证设计的中间预制板坯的管嘴位置易于加工。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:所述的热冲压成形上模具冲头尺寸与成形封头尺寸关系为:SR1为上模具冲头球面半径尺寸;该尺寸等同于封头热冲成形后内球面形状尺寸;SR2为倒角后与冲头倒圆角形成的球面,该尺寸等同于封头热冲成形后形成的光滑内球面;SR3为热冲成形后自由形状的球面;H2为上模具冲头过封头开口端面的深度,H3为热冲成形后中径截面管嘴的斜中心线上的高度,H4为热冲成形后的封头端面到管嘴端面的高度;a为成形封头管嘴中心线与上模具冲头中心线形成的夹角;Dc为热成形上冲头模具直径,Hc为热成形上模具冲头整体加工高度;C1为热成形上模具冲头加工的脱模锥度,取值为5~10°。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:所述的热冲压成形下模圈尺寸与成形封头尺寸关系为:D0为热成形时下模圈内直径尺寸,该尺寸等同于热冲成形后封头端面开口尺寸;H1为封头零件要求取环件试样的直壁高度;C2为热冲压成形时下模具的加工的锥度,取值为8~13°,R5为下模圈内壁端面的加工的锥面与模圈内壁相接面形成的倒圆角;R6为下模圈内直壁面与锥面C2相接面形成的倒圆角;Dm为热冲压成形时下模圈的外径直径,满足设计公式: $Dm = D0 + 1300 \sim 1500\text{mm}$ 。

5. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:所述的热冲压成形时中间预制板坯与成形封头锻件形状的尺寸关系,具体满足如下设计原则和公式:

1) 采用解析方法获得其关键性中间预制板坯到最终成形锻件所需尺寸,中间预制板坯的展开中面圆板直径采用等面积法计算确定,计算公式描述为:

$$\text{球形封头中性层面积: } F_{s1} = \frac{1}{8} \pi (D0 + D1)^2 + \pi (D0) \times H1$$

$$\text{球形封头毛坯表面积: } F_{s2} = \frac{1}{4} \pi (Dp)^2$$

中间预制板坯的展开中面圆板毛坯直径计算公式为:

$$D_p = \sqrt{\frac{1}{2}(D_0 + D_1)^2 + 2(D_0 + D_1) \times H_1}$$

上述公式中,球形封头中性层直径为 $\frac{1}{2}(D_0 + D_1)$ , $D_p$ 为展开中面圆板的毛坯直径; $F_{s1}$ 表示球形封头中性层面积, $F_{s2}$ 球形封头毛坯表面积, $H_1$ 为封头直壁高度;

热冲压成形中间预制板坯厚度与成形封头形状尺寸关系为: $h=0.5(D_0-D_1)$ ;

2) 凸出管嘴尺寸关系确定, $H_5$ 为球面外凸出管嘴6和7的高度,其尺寸上满足关系式: $H_5=H_4-H_2+50\sim 80\text{mm}$ , $h$ 为中间板坯厚度; $D_4$ 为球面外凸出管嘴6和7坯料的直径; $C_3$ 、 $C_4$ 分别为坯料上、下面加工的锥度,取值为 $8\sim 12^\circ$ ; $C_5$ 为中间预制板坯对应封头锻件的球面外凸出管嘴6和7中心分别封头中心线的夹角; $D_2$ 为与上模具冲头接触时的直径, $D_3$ 为球面外凸出管嘴5坯料的直径; $R_0$ 、 $R_1$ 和 $R_2$ 分别为球面外凸出管嘴与坯料主体相接面倒圆角; $L_1$ 为成形封头球面外凸出管嘴1下端面的中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间中间预制板坯的外凸出管嘴5下端面的中心与坯料中心线距离; $L_0$ 为成形封头球面外凸出管嘴2和3的下端面中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间预制板坯的外凸出管嘴6和7的下端面中心与坯料中心线的距离。

3) 锻制中间预制板坯胎模具尺寸关系,外凸出管嘴尺寸关系确定,胎模具的外圆直径 $D_n$ ,胎模具(16)的外圆直径与中间预制板坯(4)的关系: $D_n=D_p+200\sim 300\text{mm}$ ,胎模具(16)的整体高度为 $H_m$ ;锻件中间预制毛坯(18)的厚度尺寸与中间预制板坯(4)厚度关系: $H_p=h+50\sim 80\text{mm}$ 。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于根据关键性中间预制板坯的轮廓形状及尺寸参数,封头锻件(21)的管嘴部位为中间预制板坯(4)的凸出部分,其凸出部分通过胎模具(16)锻造成形方法制备,然后中间预制板坯(18)再进行机械加工处理得到热冲成形所需的中间预制板坯(4),胎模具锻造成形中间预制板坯(18)工艺包括以下步骤:

1) 圆柱坯料(15)下料,将钢锭在 $400^\circ\text{C}$ 以下装入加热炉中,以 $\leq 100^\circ\text{C/h}$ 加热速率加热至 $720^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$ ,保温 $4.5\sim 6\text{h}$ ,再以 $100\sim 150^\circ\text{C/h}$ 加热速率加热至 $1100\pm 20^\circ\text{C}$ ,保温 $4\sim 6\text{h}$ ;再以 $50\sim 100^\circ\text{C/h}$ 加热速率加热至 $1240\pm 20^\circ\text{C}$ ,保温 $15\sim 20$ 小时;取出加热钢锭(8),切除钢锭的冒口端和尾端分别为 $10\%\sim 15\%$ 和 $8\%\sim 10\%$ 的钢锭重量;针对切除得到的主体钢锭(8)采用镦粗和拔长变形方式锻制开钢坯,镦粗、拔长比均大于 $3.0$ ,镦粗、拔长的终锻温度需要控制在 $850^\circ\text{C}$ 以上;第二次镦粗后将锻钢坯(12)拔长、滚圆预制成直径为 $\text{O}2750+10\text{mm}$ 的圆柱状坯料(13),并下料为 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 的圆柱坯料(15);

2) 中间预制板坯(18)镦粗阶段变形,将预制成形的 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 圆柱坯料(15)在加热炉温度 $1250^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 加热,在重型水压机工作台上安装下胎模具(16),其下胎模具(16)中的三个型腔为中间预制板坯(4)设计时所对应的核反应堆大型封头锻件21的进水管嘴1和出水管嘴2和3。将加热均温的圆柱坯料(15)垂直放置在胎模具(16)上,尽量将两者的中心线进行对中,在圆柱坯料(15)上放置尺寸为 $\text{O}6000\times 550\text{mm}$ 的镦粗平板(14),镦粗平板(14)亦需要尽量对准上述的中心线。然后,采用重型水压机进行镦粗变形,圆柱坯料(15)在胎模具(16)上镦粗压下变形量 $36\%$ ,总压下行程为 $\Delta H=1500\text{mm}$ 时停止;

3) 分区旋转碾压锻造中间预制板坯(18),将镦粗平板(14)从坯料上吊离,采用砧宽

为900~1200mm的平砧(17)锤头继续对坯料进行分区旋转锻造,控制终锻温度在850℃以上。当坯料(18)上端面距下胎模具(16)的上端面高度为 $H_p=600\sim 700\text{mm}$ ,中间预制板毛坯(18)的外圆直径大于6750mm,其上平砧锤头最大行程控制在2000mm内,停止旋转锻造,测量坯料尺寸;

4) 将中间预制毛坯板(18)空冷至室温,检查锻造成形后的中间预制板毛坯(18)质量,采用机加工方法制备成设计的中间预制板坯(4)形状及尺寸。

7. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于:步骤1)中选用钢锭8的直径为3800mm,高度大于4870mm,质量520吨。

8. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:封头锻件整体热冲压成形工艺是将中间预制板坯(4)加热后在重型水压机载荷作用下热冲压成形为带凸出管嘴整体封头锻件(21),具体包括以下步骤:

1) 装成形模具;上冲头模具(19)为上端部位为直径与大封头的内部球半径的圆柱,在半球状的冲头方向加工有 $5\sim 10^\circ$ 脱模锥度;下端为冲头,其球半径小于大封头的内部球半径。下模具(20)为模圈其内径大于大封头的外部端面球的最大直径 $30\sim 50\text{mm}$ ,其模圈壁厚大于650mm;

2) 中间预制板坯(4)加热工艺;将中间预制板坯(4)在400℃以下装入加热炉,并使中间预制板坯(4)凸出部位的方向朝下,以 $\leq 100^\circ\text{C/h}$ 的加热速率加热至 $720^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$ ,保温1.5~3.5h,再以 $100\sim 150^\circ\text{C/h}$ 的加热速率加热至 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ ,保温2.5~4.5h,使预制板坯料(4)的加热温度均匀;

3) 冲压成形;将均温后的中间预制板坯(4)放置到成型模具的模圈上,尽量保证上模具冲头(19)、中间预制板坯(4)及下模圈(20)三者的中心线重合;重载液压机加载将中间预制板坯(4)在压力作用下热冲压成形封头锻件(21);

4) 热冲压成形过程中,重型水压机热冲压成形时上模具冲头(19)速率控制在 $10\sim 25\text{mm/s}$ ,压速率是先 $20\sim 25\text{mm/s}$ 压下总压下量约 $1/2$ ,再采用 $10\sim 15\text{mm/s}$ 压下速率缓慢压下达到总压下量稳定成形以减少表面起皱,中间预制板坯(4)中心区域部位及壁厚方向缓慢拉薄,并使中间预制板坯(4)凸出部位金属充分自由流动,热冲压成形结束后将封头锻件(21)从下模圈(20)取出,上模具冲头(19)向下压下总行程控制在圆球底部到模具开口水平距离尺寸减去成形封头机械加工前毛坯设计的厚度尺寸,终锻温度控制在850℃以上。

9. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于:所述的热冲压成形上模具冲头尺寸与成形封头尺寸关系为:SR1为上模具冲头球面半径尺寸;该尺寸等同于封头热冲成形后内球面形状尺寸;SR2为倒角后与冲头倒圆角形成的球面,该尺寸等同于封头热冲成形后形成的光滑内球面;SR3为热冲成形后自由形状的球面;H2为上模具冲头过封头开口端面的深度,H3为热冲成形后中径截面管嘴的斜中心线上的高度,H4为热冲成形后的封头端面到管嘴端面的高度,a为成形封头管嘴中心线与上模具冲头中心线形成的夹角, $D_c$ 为热成形上冲头模具直径, $H_c$ 为热成形上模具冲头整体加工高度; $C_1$ 为热成形上模具冲头加工的脱模锥度,取值为 $5\sim 10^\circ$ 。

10. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于:所述的热冲压成形下模圈尺寸与成形封头尺寸关系为: $D_0$ 为热成形时下模圈内直径尺寸,该尺寸等同于热冲成形后封头端面开口尺寸; $H_1$ 为封头零件要求取环件试样的直壁高度, $C_2$ 为热冲压成形时下模具的加工的锥度,

取值为 $8\sim 13^\circ$ ,R5为下模圈内壁端面的加工的锥面与模圈内壁相接面形成的倒圆角;R6为下模圈内直壁面与锥面C2相接面形成的倒圆角。 $D_m$ 为热冲压成形时下模圈的外径直径,满足设计公式: $D_m=D_0+1300\sim 1500\text{mm}$ 。

## 核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于锻件锻造技术领域,适用于核电设备大型压力容器带多个凸出管嘴封头锻件的热冲压整体成形工艺和生产制造过程,具体为核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法。

### 背景技术

[0002] 核电作为一种稳定、洁净、高能量密度的能源,对调整能源结构、改善生态环境和降低碳排放有着重要的作用。核电站核岛大型压力容器封头是核电站主设备中最重要的承压部件,具有形状复杂、轮廓尺寸大、重量大和结构一体化等特点,核电机组对大型压力容器的技术要求很高并且其执行标准十分严格,除需要具备高性能和长运转周期外,还要求便于检验和机组设备维护。该类核电机组设备中带多个凸出管嘴大型封头锻件是非能动大型先进压水堆核电机组的关键性承压与抗辐射零部件之一,当前该型的核电设备技术开发及应用研究已成为核电技术研究的主要趋势。

[0003] 大型封头的制造过程属于典型的大构件极端热制造成形过程,该类压力容器封头热成形后锻件尺寸端口外径通常大于4500mm,壁厚超过350mm,整体高度大于3500mm;其不仅体积庞大、重量达到百余吨,而且成形工艺需要整体锻造出凸出球面接出、入水管的三个外接管嘴。由于实验条件极为困难且生产制备技术难度很大,大型压力容器的制造成形成为重大装备制造业的主要技术瓶颈之一。到目前为止,核电站大型的压力壳、蒸汽发生器、稳压器锻件等关键性部件,在国际上也只有少数几家公司能够生产制造。

[0004] 传统生产带多个凸出管嘴大型压力容器时,一种方法是采用多焊缝方式后期拼装与焊接制备。由于大型压力容器体型及尺寸大、单件产品的质量大和整体形状十分复杂,在堆焊过程中需要对锻件反复进行预热和焊后热处理,如果局部位置过多的采用焊接方法会导致内部产生层状撕裂裂纹。为了提高新一代核反应堆压力容器的安全性,传统多焊缝压力容器制造方法已不能满足核电装备运行的性能要求和检查的周期。

[0005] 传统整体锻造成形方法是采用凸模小变形分区逐次旋转碾压锻造方法成形,而该方法存在诸多难以克服的问题:坯料加热时是圆柱形大块体,要实现心部也达到锻造均匀温度,其需要长时间高温加热,这会导致初始晶粒粗大,同时热锻成形也容易出现开裂等问题。终锻成形的材料转移量非常大,温度场与应变场都极不均匀,要实现材料均匀流动极其困难,导致水嘴部位难以填充,易形成流线紊乱、材料折叠等缺陷,且变形后组织也不均,混晶严重。因此,采用分区锻造方法成形时间长、热量损失严重,因温度下降导致后期变形困难,需要进行多火次热成形;同时,由于热锻造获得的毛坯锻件与实际机加工件形状相差甚远,机械加工余量大,费时长。

### 发明内容

[0006] 本发明的发明目的是针对上述问题,提供一种制造外径大带多个凸出管嘴核电设备压力容器的封头锻件整体成形方法,该方法解决了传统带管嘴压力容器封头焊接成形时

易开裂和采用小凸模分区碾压时的成形困难、材料流动不合理、产品性能及质量难以保证以及机械加工余量大等技术问题。该技术发明将传统的终锻成形难度所存在的技术难点进行有效分解,提供了一种包括核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形关键性中间预制坯料设计、中间预制板坯胎模具锻造成形和大型压力容器封头锻件热冲压成形方法。从制备方法上改变了传统的拼焊制备为整体成形;从成形方法上将传统圆柱坯料的多火次凸模小变形量碾压成形工艺分解为两步,先将圆柱坯料采用胎模具作为下模具锻造成中间预制板坯,再将中间预制板坯采用热冲压方法成形为要求的封头锻件。该技术发明能够很好的控制带多个凸出管嘴封头锻件成形质量和组织性能,从而为后续的热处理提供良好的初始组织状态,并且大大减少终锻成形后锻件的机加工余量,缩短该类锻件的生产周期。

[0007] 本发明的具体技术方案如下:

[0008] 核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法,包括中间预制板坯锻造成形工艺和封头锻件热冲压成形工艺。

[0009] 在中间预制板坯锻造成形工艺进行之前,需要对核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形关键性中间预制板坯设计;根据关键性中间预制板坯的轮廓形状及尺寸参数,封头锻件的管嘴部位为中间预制板坯的凸出部分,其凸出部分通过胎模具锻造成形方法制备,后中间预制板坯再进行机械加工处理得到热冲成形所需的中间预制板坯,再进行预制板坯料的热冲压成形。

[0010] 核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形的关键性中间预制板坯设计原则及要求如下:

[0011] 步骤一、采用解析方法计算获得由中间预制板坯到最终热冲压成形锻件时所需要的预制板坯设计的各部分尺寸公式;

[0012] 步骤二、采用有限元模拟技术对上述解析方法获得的中间预制板坯设计尺寸及参数进行校核与优化,获得了设计中间预制板坯的关键性尺寸及参数。

[0013] 所述步骤一中,中间预制板坯的外伸出凸出位置管嘴坯料尺寸遵循包含原则,其凸出部位坯料体积设计时为实际锻件水嘴体积的1.1~1.2倍,并且设计轮廓形状完全包含热冲锻件的轮廓。

[0014] 所述步骤二中,采用有限元技术数值模拟优化预制坯料时,先对解析法确定的初始中间预制板坯进行热成形模拟并得到成形结束时工件形状,再追踪需要优化的局部位置坯料尺寸,当追踪点返回到初始状态时即可得到局部位置坯料的优化形状尺寸。

[0015] 所述步骤二中,采用有限元技术数值模拟优化中间预制板坯形状尺寸,在满足成形零件的形状及尺寸要求情况下,切除掉在中间预制板坯成形时的多余材料,使最终成形时坯料接触上冲头模具后外轮廓自由成形;同时,保证设计的中间预制板坯带管嘴位置易于加工。

[0016] 热冲压成形上模具冲头尺寸与成形封头尺寸关系为:SR1为上模具冲头球面半径尺寸;该尺寸等同于封头热冲成形后内球面形状尺寸;SR2为倒角后与冲头倒圆角形成的球面,该尺寸等同于封头热冲成形后形成的光滑内球面;SR3为热冲成形后自由形状的球面。H2为上模具冲头过封头开口端面的深度,H3为热冲成形后中径截面管嘴的斜中心线上的高度,H4为热冲成形后的封头端面到管嘴端面的高度。 $a$ 为成形封头管嘴中心线与上模具冲头

中心线形成的夹角。 $D_c$ 为热成形上冲头模具直径, $H_c$ 为热成形上模具冲头整体加工高度。 $C_1$ 为热成形上模具冲头加工的脱模锥度,取值为 $5\sim 10^\circ$ 。

[0017] 热冲压成形下模圈尺寸与成形封头尺寸关系为: $D_0$ 为热成形时下模圈内直径尺寸,该尺寸等同于热冲成形后封头端面开口尺寸; $H_1$ 为封头零件要求取环件试样的直壁高度。 $C_2$ 为热冲压成形时下模具的加工的锥度,取值为 $8\sim 13^\circ$ , $R_5$ 为下模圈内壁端面的加工的锥面与模圈内壁相接面形成的倒圆角; $R_6$ 为下模圈内直壁面与锥面 $C_2$ 相接面形成的倒圆角。 $D_m$ 为热冲压成形时下模圈的外径直径,满足设计公式: $D_m = D_0 + 1300\sim 1500\text{mm}$ 。

[0018] 按上述方案要求,热冲压成形时中间预制板坯与成形封头形状关键性尺寸关系,具体满足如下设计原则和公式:

[0019] 步骤一、采用解析方法获得其关键性中间预制板坯到最终成形锻件所需尺寸,中间预制板坯的展开中面圆板直径采用等面积法计算确定,具体计算公式描述为:

$$[0020] \quad \text{球形封头中性层面积: } F_{s1} = \frac{1}{8}\pi(D_0 + D_1)^2 + \pi(D_0) \times H_1$$

$$[0021] \quad \text{球形封头毛坯表面积: } F_{s2} = \frac{1}{4}\pi(D_p)^2$$

[0022] 中间预制板坯的展开中面圆板毛坯直径计算公式为:

$$[0023] \quad D_p = \sqrt{\frac{1}{2}(D_0 + D_1)^2 + 2(D_0 + D_1) \times H_1}$$

[0024] 上述公式中,球形封头中性层直径为 $\frac{1}{2}(D_0 + D_1)$ , $D_p$ 为展开中面圆板的毛坯直径;

$F_{s1}$ 表示球形封头中性层面积, $F_{s2}$ 球形封头毛坯表面积, $H_1$ 为封头直壁高度。

[0025] 热冲压成形所需的中间预制板坯料厚度与成形封头形状尺寸关系为: $h = 0.5(D_0 - D_1)$ 。

[0026] 步骤二、凸出管嘴尺寸关系确定, $H_5$ 为球面外凸出管嘴6和7的高度,其尺寸上满足关系式: $H_5 = H_4 - H_2 + 50\sim 80\text{mm}$ , $h$ 为中间预制板坯厚度。 $D_4$ 为球面外凸出管嘴6和7坯料的直径。 $C_3$ 、 $C_4$ 分别为坯料上、下面加工的锥度,取值为 $8\sim 12^\circ$ 。 $C_5$ 为中间预制板坯对应封头锻件的球面外凸出管嘴6和7中心分别封头中心线的夹角。 $D_2$ 为与上模具冲头接触时的直径, $D_3$ 为球面外凸出管嘴5坯料的直径。 $R_0$ 、 $R_1$ 和 $R_2$ 分别为球面外凸出管嘴与中间预制板坯主体相接面倒圆角; $L_1$ 为成形封头球面外凸出管嘴1下端面的中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间预制板坯的球面外凸出管嘴5下端面的中心与中间预制板坯中心线距离。 $L_0$ 为成形封头球面外凸出管嘴2和3的下端面中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间坯料的球面外凸出管嘴6和7的下端面中心与坯料中心线的距离。

[0027] 步骤三、锻制中间预制板毛坯的胎模具尺寸设计,凸出管嘴尺寸关系确定,胎模具的外圆直径 $D_n$ ,胎模具的外圆直径与板坯料的关系: $D_n = D_p + 200\sim 300\text{mm}$ ,胎模具的整体高度为 $H_m$ 。锻件毛坯料的厚度尺寸与中间预制板坯厚度关系: $H_p = h + 50\sim 80\text{mm}$ 。

[0028] 关键性中间预制板坯制备工艺,基于设计所得关键性中间预制板坯轮廓形状及尺寸参数,其封头锻件管嘴部位为预制坯的凸出设计,其凸出部分通过胎模具锻造成形方法制备,后中间预制板坯再进行机械加工处理得到热冲成形所需的中间预制板坯。

[0029] 中间预制板坯锻造成形工艺,包括以下具体制造过程:



[0030] 步骤一、圆柱坯料下料,选用钢锭的直径为3800mm,高度大于4870mm,质量达520吨。将钢锭在400℃以下装入加热炉中,以 $\leq 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 加热速率加热至720℃~800℃,保温4.5~6h,再以100~150℃/h加热速率加热至1100±20℃,保温4~6h;再以50~100℃/h加热速率加热至1240±20℃,保温15~20小时;取出加热钢锭,切除钢锭的冒口端和尾端分别约为10%~15%和8%~10%的钢锭重量。针对切除得到的主体钢锭采用镦粗和拔长变形方式锻制开钢坯,其镦粗、拔长比均大于3.0,其镦粗、拔长的终锻温度控制在850℃以上。第二次镦粗后将锻钢坯拔长、滚圆预制成直径为 $\text{O}2750\pm 15\text{mm}$ 的圆柱状坯料,并下料为 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 的圆柱坯料。

[0031] 步骤二、中间预制板毛坯镦粗阶段变形,将下料为 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 的圆柱坯料,回炉加热均匀温度到1250℃±10℃。在水压机工作台上安装下胎模具,其下胎模具中的三个型腔为预制板坯料设计时所对应的核反应堆大型封头锻件的进水管嘴和出水管嘴。将加热均温的圆柱坯料垂直放置在胎模具上,尽量将两者的中心线进行对中,在圆柱坯料上放置尺寸为 $\text{O}6000\times 550\text{mm}$ 的镦粗平板,镦粗平板亦需要尽量对准上述的中心线。然后,采用重型水压机进行镦粗变形,圆柱坯料在胎模具上镦粗压下变形量约36%,总压下行程为 $\Delta H=1500\text{mm}$ 时停止。

[0032] 步骤三、分区旋转锻造预制中间毛坯板,将镦粗平板从坯料上吊离,采用砧宽为900~1200mm的平砧锤头继续对坯料进行分区旋转锻造,控制终锻温度在850℃以上。当坯料上端面距下胎模具的上端面高度为 $H_p=600\sim 700\text{mm}$ ,坯料的外圆直径大于6750mm,其上平砧锤头最大行程控制在2000mm内,停止旋转锻造,测量坯料尺寸。

[0033] 步骤四、将中间预制毛坯板料空冷至室温,检查锻造成形后的中间预制板毛坯质量,采用机加工方法制备成设计的中间预制板坯形状及尺寸。

[0034] 按上述要求,将中间预制板坯加热后在重载液压机载荷作用下热冲压成形为带凸出管嘴的整体封头锻件。具体热冲压成形过程描述为:

[0035] 步骤一、安装成形模具;上冲头模具为上端部位为直径与大封头的内部球半径的圆柱,在半球状的冲头方向加工有5~10°脱模锥度;下端为冲头,其球半径小于大封头的内部球半径。下模具为模圈其内径大于大封头的外部端面球径的最大直径30~50mm,其模圈壁厚大于650mm。

[0036] 步骤二、中间预制板坯加热工艺;将中间预制板坯在400℃以下装入加热炉,并使坯料凸出部位的方向朝下,以 $\leq 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 的加热速率加热至720℃~800℃,保温1.5~3.5h,再以100~150℃/h的加热速率加热至1000~1100℃,保温2.5~4.5h,使预制板坯的加热温度均匀。

[0037] 步骤三、热冲压成形;将均温后的中间预制板坯放置到成型模具的模圈上,尽量保证上模具冲头、中间预制板坯及下模圈三者的中心线重合。重型水压机加载将中间预制板坯在压力作用下热冲压成形。

[0038] 步骤四、热冲压成形过程中,重型水压机热冲压成形时上模具冲头速率控制在10~25mm/s,压速率是先20~25mm/s压下总压下量约1/2,再采用10~15mm/s压下速率缓慢压达到总压下量稳定成形以减少表面起皱,坯料中心区域部位及壁厚方向缓慢拉薄,并使坯料凸出部位金属充分自由流动,热冲压成形结束后将锻件从下模圈取出。上模具冲头与成形坯料接触后,上模具冲头向下压下总行程控制在圆球底部到模具开口水平距离尺寸减

去成形封头机械加工前毛坯设计的厚度尺寸,终锻温度控制在850℃以上。

[0039] 本发明的积极效果体现在:

[0040] (一)本发明基于锻件热冲成形质量需要遵循的设计原则,采用几何解析方法和数值模拟技术设计出关键性中间预制板坯形状,重点研究了大型封头锻件整体锻制终锻成形时从关键性中间预制板坯热冲压成形过程中锻件形状尺寸的关系;开发了核反应堆带多管嘴大型封头锻件整体锻造成形过程的中间预制板坯和最终热冲压带多个凸出管嘴的封头锻件。

[0041] (二)本发明的第一道工序采用的胎模具成形分区逐次旋转碾压锻造方法,使中间预制板坯的管嘴形状借助胎模具以自由锻造方法充填成形,该方法不仅使锻造轮廓形状及尺寸得到有效控制,还能合理分散预制板坯的金属,实现内部组织均匀、成形流线清晰以及良好的纤维组织。第二道工序采用热冲压整体成形,所需压力机载荷力小,成形过程中热量损耗小,坯料加热温度低、加热时间短,从而控制终锻成形的晶粒长大;热冲压成形后的大封头锻件能有效地控制产品形状,壁厚尺寸均匀,保证产品质量。

[0042] (三)本发明基于传统工艺存在的不足,该发明结合产品形状特点及生产可行性,采用两道成形工序分解传统凸模小变形分区逐次旋转碾压多火次成形难度。第一道工序通过解析方法和计算机模拟设计优化反求中间预制板坯料的形状,采用胎模具成形分区逐次旋转碾压锻造方法制备中间预制板坯,经机加工处理获得热冲压成形所需的关键性中间预制板坯。第二道工序将中间预制板坯采用重型压机进行热冲压成形为封头锻件。该发明的显著特点是:第一道工序采用的胎模具成形分区逐次旋转碾压锻造方法,使中间预制板坯的管嘴形状借助胎模具以自由锻造成形方法更容易充填成形,而且板坯的金属材料能得以有效分散,毛坯板面锻造形状及尺寸均易控制。锻制结束后获得的中间预制板坯具有均匀内部组织、清晰成形流线和趋于一致的纤维组织和轮廓形状。第二道工序采用热冲压整体成形,该成形工艺属于大位移、小应变工艺方案,所需压力机载荷力小。由于坯料厚度小,热冲压成形前坯料加热时容易实现坯料温度均匀,与传统整体锻造成形圆柱坯料相比,可显著缩短加热时间;而且热冲压成形时间很短,成形过程中热量损耗小,能够有效降低热冲压成形坯料的加热温度,从而利于控制终锻成形晶粒长大,保证产品质量。

## 附图说明

[0043] 图1为核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件的结构剖示图;

[0044] 图2为核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件的管嘴位置示意图;

[0045] 图3为中间预制板坯A进水管嘴形状剖示图;

[0046] 图4为中间预制板坯F出水管嘴形状剖示图;

[0047] 图5为中间预制板坯多个凸出管嘴位置示意图;

[0048] 图6为采用重型水压机预制坯料镦粗、拔长及下料过程示意图;

[0049] 图7为采用重型水压机平板镦粗初始状态示意图;

[0050] 图8为平砧锤头分区旋转锻造中间预制板坯示意图;

[0051] 图9为平砧锤头分区旋转锻造中间预制板坯俯视图;

[0052] 图10为热冲压成形上模具球形冲头示意图

[0053] 图11为热冲压成形下模圈示意图

[0054] 图12为具有凸出管嘴1特征热冲初始状态中切割示截面

[0055] 图13为具有凸出管嘴2特征热冲初始状态中切割示截面

[0056] 图14为具有管嘴1和3特征热冲压成形结束后锻件中切割示截面

[0057] 其中,1—进水管嘴,2—中心距为L夹角(90+b)角度位置的出水管嘴,3—中心距为L夹角(270-b)角度位置的出水管嘴,4—热冲压成形的中间预制板坯,5—中间预制板坯上对应封头管嘴1的成形坯料,6—中间预制板坯上对应封头管嘴2的成形坯料,7—中间预制板坯上对应封头管嘴3的成形坯料,8—钢锭切头尾;9—切头、尾钢锭开坯第一次拔长方坯;10—第一次拔长后方坯第一次墩粗;11—第一次墩粗后钢坯第二次拔长;12—钢坯第二次拔长后第二次墩粗;13—第二次墩粗后钢坯第三次拔长、滚圆和下料,14—模锻前墩粗用圆平板,15—锻制中间预制板毛坯用圆柱钢坯,16—关键性中间预制板坯上管嘴对应位置特征的胎模具,17—分区锻造用上模具平砧,18—分区锻造后中间预制板毛坯,19—热冲压成形上模具冲头,20—热冲压成形下模圈,21—热冲压成形结束后封头锻件

### 具体实施方式

[0058] 下面结合具体实施例和比较例进一步阐述本发明。应理解为,这些实施例仅用于说明本发明而不适用于限制本发明的范围。此外应理解为,在阅读了本发明讲授的内容之后,本领域技术人员可以对本发明作各种改动或修改,这些等价形式同样落于本申请所限定的范围。

[0059] 一种核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形方法,包括胎模锻成形中间预制板毛坯工艺和封头锻件热冲压成形工艺。在进行胎模具锻造成形中间预制板毛坯工艺前,先进行核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件整体锻造成形关键性中间预制板坯设计。

[0060] 下面具体描述本发明核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件21整体锻造成形关键性中间预制板坯4设计、胎模具16锻造成形预制板毛坯18和封头锻件21热冲压成形实施方案。

[0061] 一种核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件21整体锻造成形关键性中间预制板坯4设计,采用解析方法计算获得由中间预制板坯4到最终热冲压成形结束时的封头锻件21时所需要的中间预制板坯4设计的各部分公式的关键性形状参数。

[0062] 热冲压成形上模具冲头19尺寸与成形结束时的封头锻件21尺寸关系为:

[0063] SR1为上模具冲头19球面半径尺寸;该尺寸等同于封头锻件21热冲成形后内球面形状尺寸。SR2为倒角后与冲头19倒圆角形成的球面,该尺寸等同于封头锻件21热冲成形后形成的光滑内球面;SR3为热冲成形封头锻件21的自由形状的球面。H2为上模具冲头19过封头开口端面的深度,H3为热冲成形封头锻件21中径截面凸出管嘴1的斜中心线上的高度,H4为热冲成形封头锻件21的端面到凸出管嘴端面的高度。a为成形封头锻件21管嘴中心线与上模具冲头19中心线形成的夹角。Dc为热成形上冲头模具19直径,Hc为热成形上模具冲头19整体加工高度。C1为热成形上模具冲头19加工的脱模锥度,取值为 $5\sim 10^\circ$ 。

[0064] 热冲压成形下模圈20尺寸与成形封头锻件21尺寸关系为:

[0065] D0为热成形时下模圈20内直径尺寸,该尺寸等同于热冲成形后封头锻件21端面开口尺寸;H1为成形封头锻件21要求取环件试样的直壁高度。C2为热冲压成形时下模圈20放

置热冲压主体坯料4内壁端面的加工的锥度,取值为 $8\sim 13^\circ$ ,R5为下模圈20内壁端面的加工的锥面与下模圈20内壁相接面形成的倒圆角;R6为下模圈20内直壁面与锥面C2相接面形成的倒圆角。 $D_m$ 为热冲压成形时下模圈20的外径直径,并且满足设计公式: $D_m = D_0 + 1500\text{mm}$ 。

[0066] 热冲压成形时中间预制板坯4与成形封头锻件21关键性尺寸关系具体满足如下设计原则和公式:

[0067] 步骤一、采用解析方法获得其关键性中间预制板坯4到最终成形封头锻件21所需尺寸,中间预制板坯4的展开中面圆板直径采用等面积法计算确定,其计算公式为:

$$[0068] \quad \text{球形封头锻件21中性层面积: } F_{s1} = \frac{1}{8}\pi(D_0 + D_1)^2 + \pi(D_0) \times H_1$$

$$[0069] \quad \text{球形封头锻件21毛坯表面积: } F_{s2} = \frac{1}{4}\pi(D_p)^2$$

[0070] 中间预制板坯4展开中面圆板的毛坯直径为,其计算公式为:

$$[0071] \quad D_p = \sqrt{\frac{1}{2}(D_0 + D_1)^2 + 2(D_0 + D_1) \times H_1}$$

[0072] 上述公式中,球形封头锻件21中性层直径为 $\frac{1}{2}(D_0 + D_1)$ , $D_p$ 为展开中面圆板的毛坯直径; $F_{s1}$ 表示球形封头锻件21中性层面积, $F_{s2}$ 球形封头锻件21毛坯表面积, $H_1$ 为球形封头锻件的直壁高度。

[0073] 热冲压成形中间预制板坯4厚度与成形封头锻件21端面开口尺寸关系为: $h = 0.5(D_0 - D_1)$ 。

[0074] 步骤二、凸出管嘴尺寸确定, $H_5$ 为球面外凸出管嘴6和7的高度,其尺寸上满足关系式: $H_5 = H_4 - H_2 + 50 \sim 80\text{mm}$ , $h$ 为中间预制板坯厚度。 $D_4$ 为球面外凸出的管嘴6和7坯料的直径。 $C_3$ 、 $C_4$ 分别为坯料上、下面加工的锥度,取值为 $8\sim 12^\circ$ 。 $C_5$ 为中间预制板坯对应封头锻件的球面外凸出管嘴6或7中心线与坯料中心线的夹角。 $D_2$ 为与上模具冲头接触时的直径, $D_3$ 为球面外凸出管嘴5坯料的直径。 $R_0$ 、 $R_1$ 和 $R_2$ 分别为球面外凸出管嘴与中间预制板坯主体相接面倒圆角; $L_1$ 为成形封头球面外凸出管嘴1下端面的中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间预制板坯的球面外凸出管嘴5下端面的中心与坯料中心线距离。 $L_0$ 为成形封头球面外凸出管嘴2和3的下端面中心与封头中心线的距离,该尺寸设计为中间坯料的球面外凸出管嘴6和7的下端面中心与坯料中心线的距离。

[0075] 步骤三、锻制中间预制板毛坯的胎模具尺寸关系及凸出管嘴尺寸关系确定,胎模具的外圆直径 $D_n$ ,胎模具的外圆直径与中间预制板毛坯直径的关系: $D_n = D_p + 200 \sim 300\text{mm}$ ,胎模具的整体高度为 $H_m$ 。锻件毛坯料的厚度尺寸与中间预制板坯的厚度关系: $H_p = h + 50 \sim 80\text{mm}$ 。

[0076] 基于设计所得关键性中间预制板坯4轮廓形状及尺寸参数,其封头锻件21管嘴部位为中间预制板坯4的凸出设计,其凸出部分通过胎模具16自由锻造方法制备,后中间预制板坯18再进行机械加工处理得到热冲成形所需的中间预制板坯4。

[0077] 具体制造过程描述为:

[0078] 步骤一、圆柱坯料15下料工艺,选用钢锭8的直径为 $3800\text{mm}$ ,高度大于 $4870\text{mm}$ ,质量达 $520\text{吨}$ 。将钢锭在 $400^\circ\text{C}$ 以下装入加热炉中,以 $\leq 100^\circ\text{C/h}$ 加热速率加热至 $720^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ ,

保温4.5~6h,再以100~150℃/h加热速率加热至1100±20℃,保温4~6h;再以50~100℃/h加热速率加热至1240±20℃,保温15~20小时;取出加热钢锭8,切除钢锭的冒口端和尾端分别约为10%~15%和8%~10%的钢锭重量。针对切除得到的主体钢锭8采用镦粗和拔长变形方式锻制开钢坯,镦粗、拔长比均大于3.0,镦粗、拔长的终锻温度需要控制在850℃以上。第二次镦粗后将锻钢坯12拔长、滚圆预制成直径为 $\text{O}2750+10\text{mm}$ 的圆柱状坯料13,并下料为 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 的圆柱坯料15。

[0079] 步骤二、中间预制板坯的镦粗变形,将预制成形的 $\text{O}2750\times 4100\text{mm}$ 圆柱坯料15在加热炉温度1250℃±10℃加热。在重型水压机工作台上安装下胎模具16,其下胎模具16中的三个型腔为中间预制板坯4设计时所对应的核反应堆大型封头锻件21的进水管嘴1和出水管嘴2和3。将加热均温的圆柱坯料15垂直放置在胎模具16上,尽量将两者的中心线进行对中,在圆柱坯料15上放置尺寸为 $\text{O}6000\times 550\text{mm}$ 的镦粗平板14,镦粗平板14亦需要尽量对准上述的中心线。然后,采用重型水压机进行镦粗变形,圆柱坯料15在胎模具16上镦粗压下变形量约36%,总压下行程为 $\Delta H=1500\text{mm}$ 时停止。

[0080] 步骤三、分区旋转锻造预制中间毛坯板料18,将镦粗平板14从坯料上吊离,采用砧宽为900~1200mm的平砧17锤头继续对坯料进行分区旋转锻造,控制终锻温度在850℃以上。当坯料18上端面距下胎模具16的上端面高度为 $H_p=600\sim 700\text{mm}$ ,坯料18的外圆直径大于6750mm,其上平砧锤头最大行程控制在2000mm内,停止旋转锻造,测量坯料尺寸。

[0081] 步骤四、将中间预制毛坯板料18空冷至室温,检查锻造成形后的中间预制板毛坯18质量,采用机加工方法制备成设计的中间预制板坯4形状及尺寸。

[0082] 将所述的中间预制板坯4加热后在重载液压机载荷作用下热冲压成形为带凸出管嘴的整体封头锻件21。

[0083] 具体实施步骤描述为:

[0084] 步骤一、安装成形模具;上冲头模具19为上端部位为直径与大封头的内部球半径的圆柱,在半球状的冲头方向加工有5~10°脱模锥度;下端为冲头,其球半径小于大封头的内部球半径。热冲压成形所用的下模圈20为内径大于大封头的外部端面球的最大直径30~50mm,其模圈壁厚大于650mm。

[0085] 步骤二、中间预制板坯4加热工艺;将中间预制板坯4在400℃以下装入加热炉,并使中间预制板坯4凸出部位的方向朝下,以 $\leq 100\text{℃/h}$ 的加热速率加热至720℃~800℃,保温1.5~3.5h,再以100~150℃/h的加热速率加热至1000~1100℃,保温2.5~4.5h,使中间预制板坯4的加热温度均匀。

[0086] 步骤三、热冲压成形;将均温后的中间预制板坯4放置到成型模具的模圈上,尽量保证上模具冲头19、中间预制板坯4及下模圈20三者的中心线重合。重载液压机加载将中间预制板坯4在压力作用下热冲压成形封头锻件21。

[0087] 步骤四、热冲压成形过程中,重型水压机热冲压成形时上模具冲头19速率控制在10~25mm/s,压速率是先20~25mm/s压下总压下量约1/2,再采用10~15mm/s压下速率缓慢压达到总压下量稳定成形以减少表面起皱,中间预制板坯4中心区域部位及壁厚方向缓慢拉薄,并使中间预制板坯4凸出部位金属充分自由流动,热冲压成形结束后将封头锻件21从下模圈20取出,上模具冲头19向下压下总行程控制在圆球底部到模具开口水平距离尺寸减去成形封头机械加工前毛坯设计的厚度尺寸,终锻温度控制在850℃以上。

[0088] 本发明解决了核电设备压力容器封头直径大,带多个位置凸出管嘴整体锻造的关键技术难点,同时有效减少热冲压时锻件起皱和拉裂等问题,使制件性能更加均匀。

[0089] 本发明用于生产制造核反应堆带多个凸出管嘴大型封头锻件,成形后封头锻件21尺寸满足机械加工时所需形状要求及检测截面和零件剖示截面。

[0090] 以上所述实例仅是本专利的优选实施方式,但本专利的保护范围并不局限于此。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本专利原理的前提下,根据本专利的技术方案及其专利构思,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本专利的保护范围。

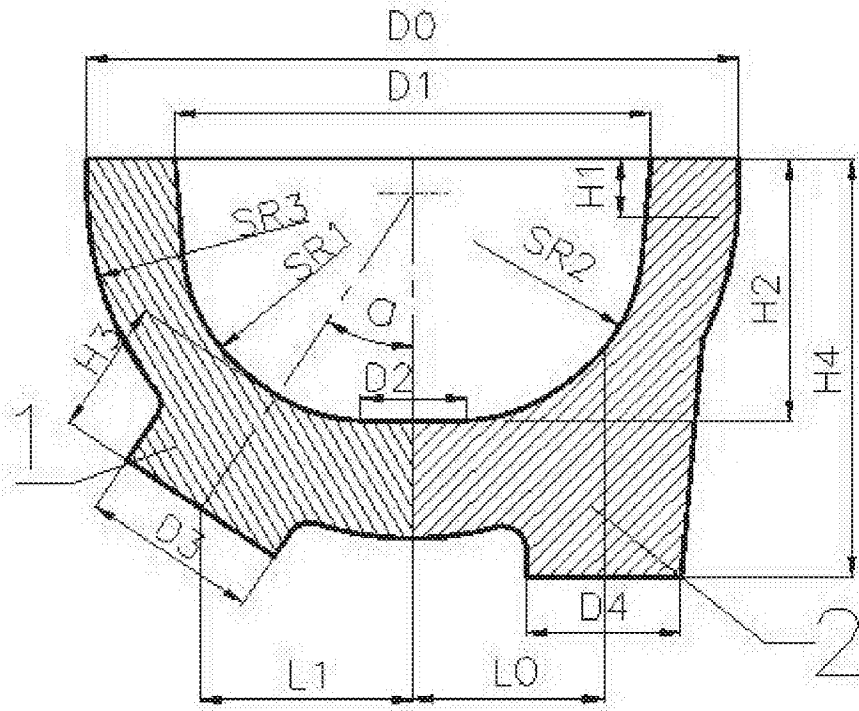


图1

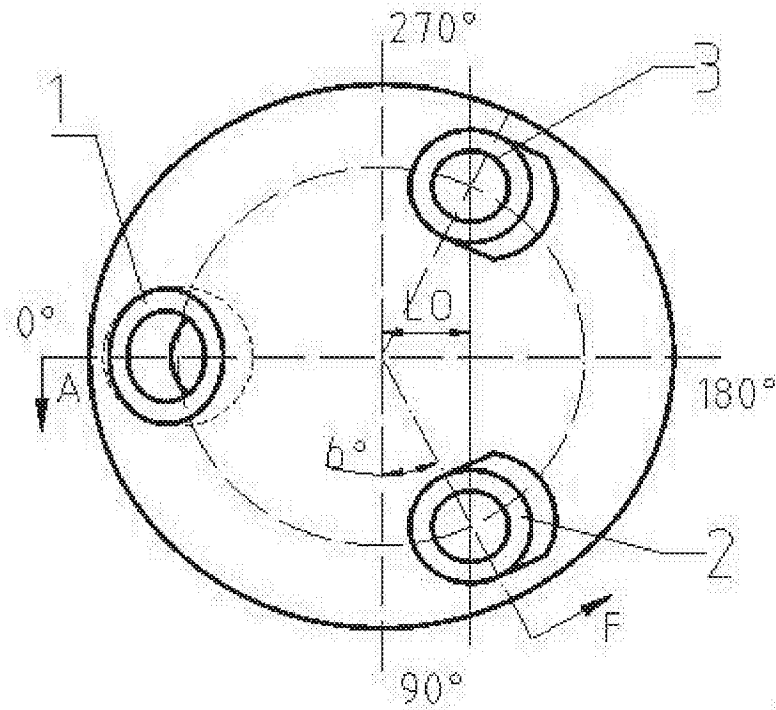


图2

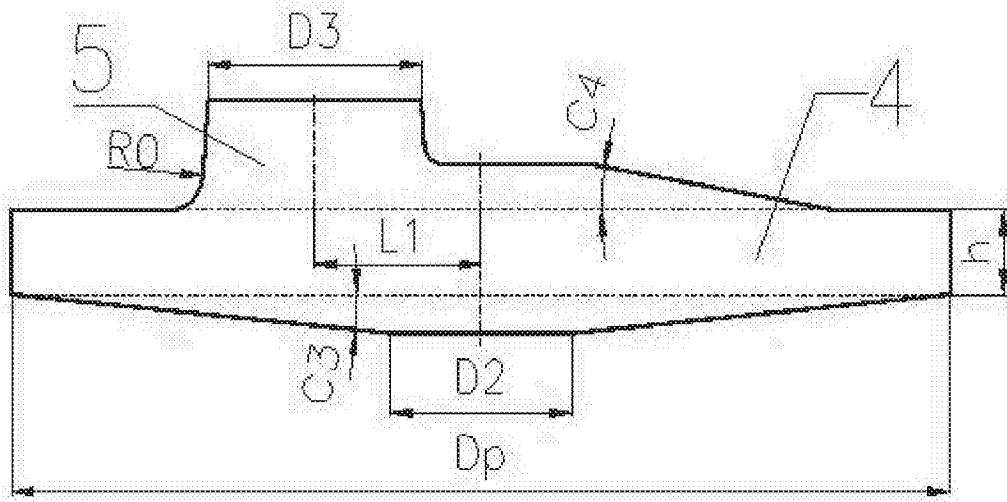


图3

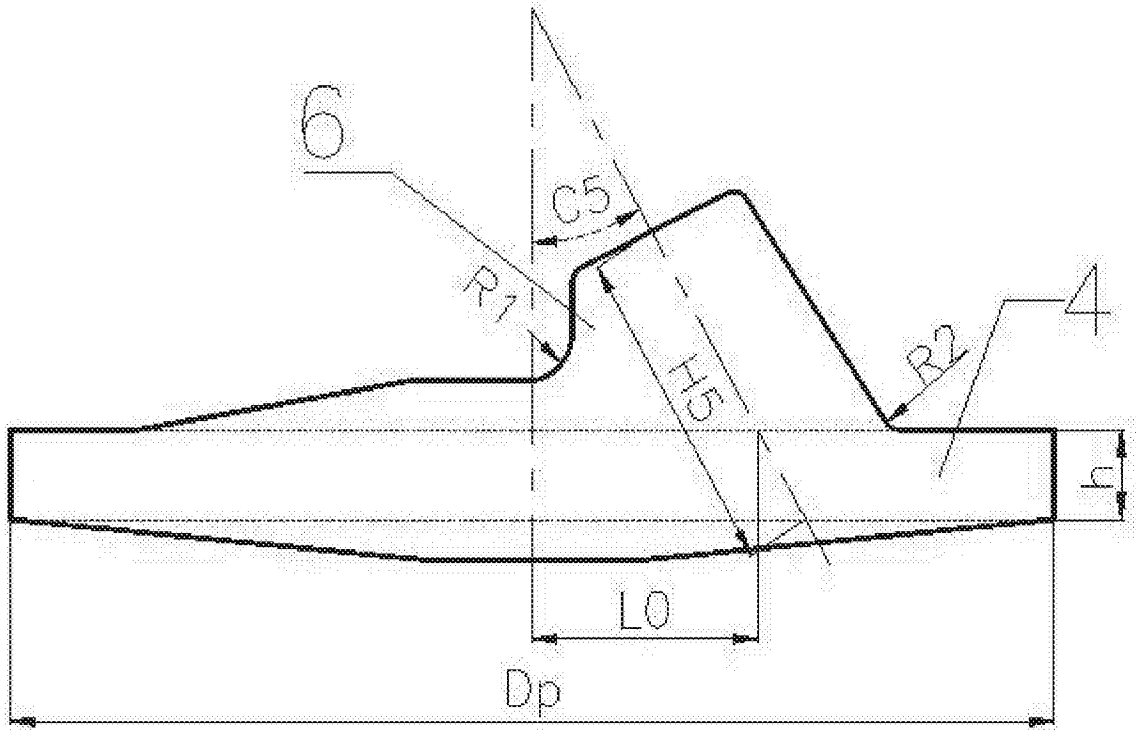


图4



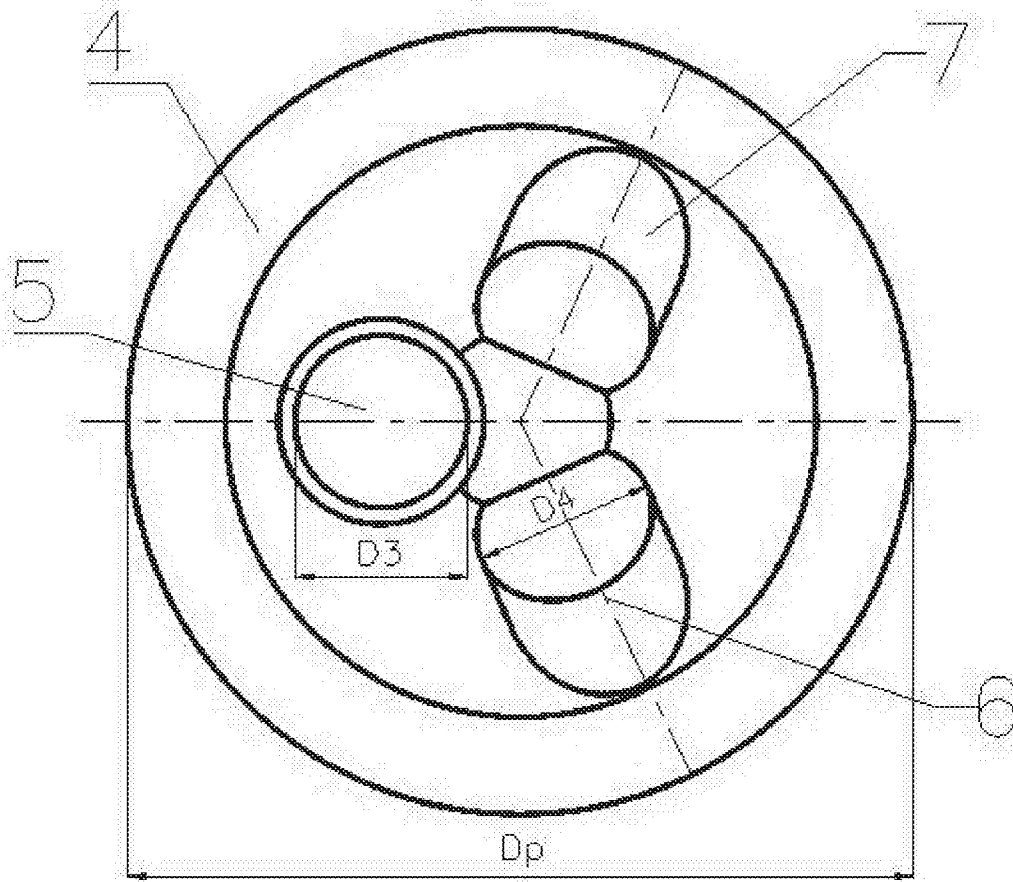


图5

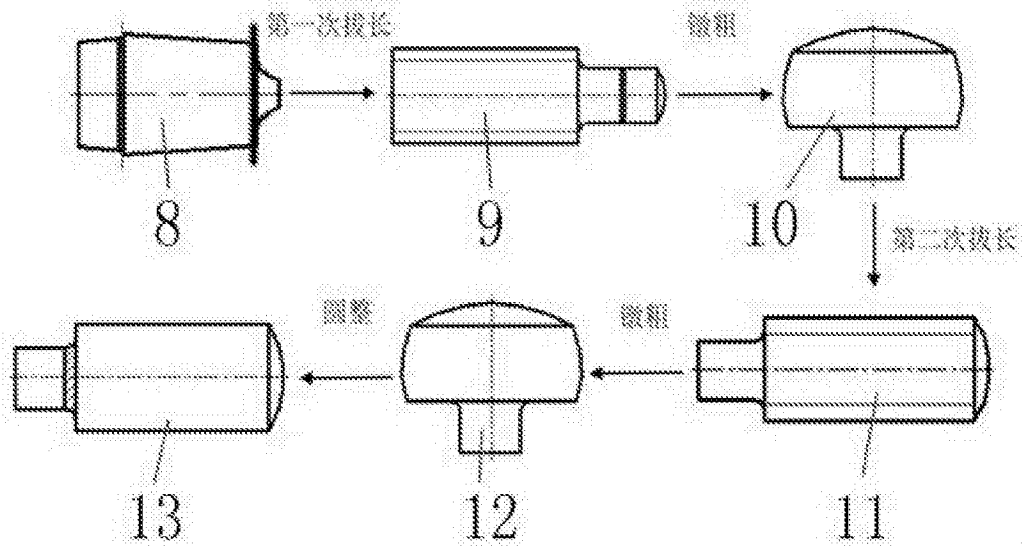


图6

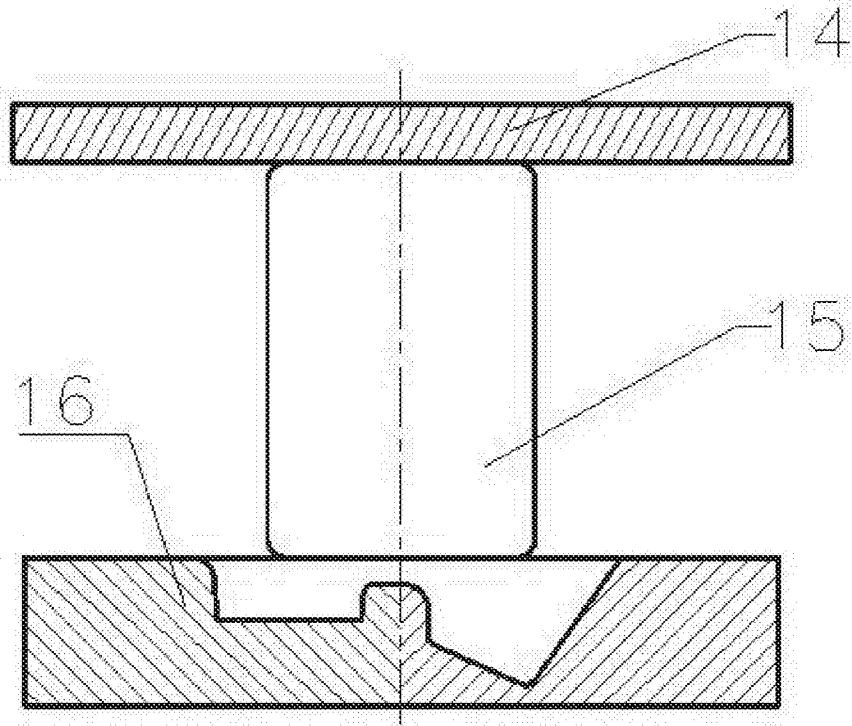


图7

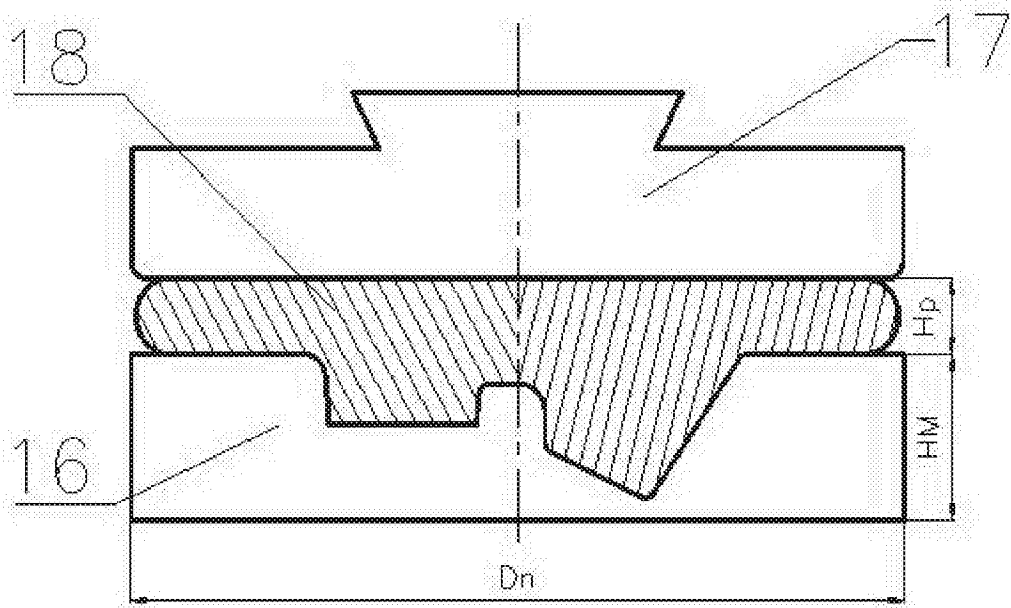


图8

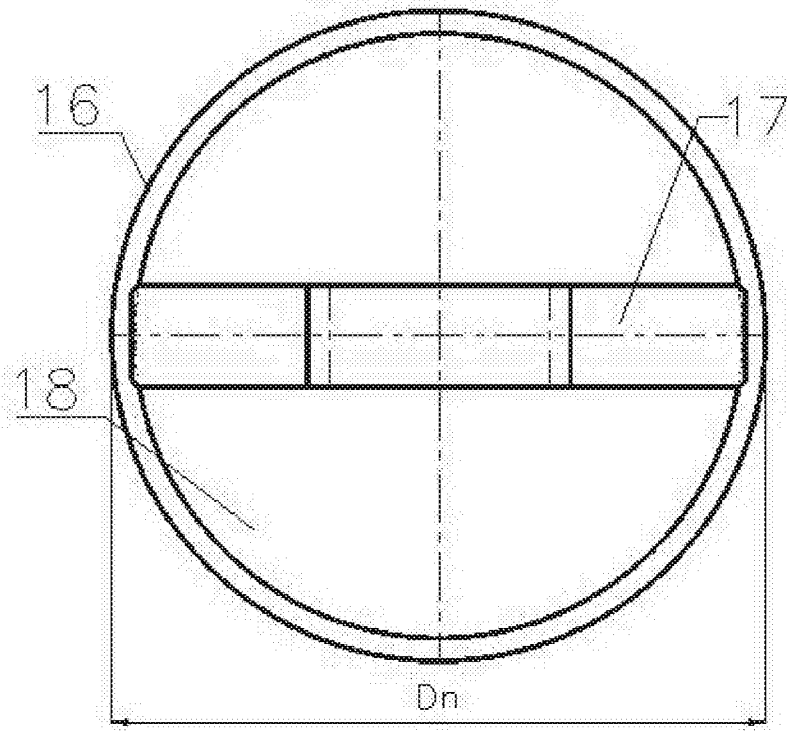


图9

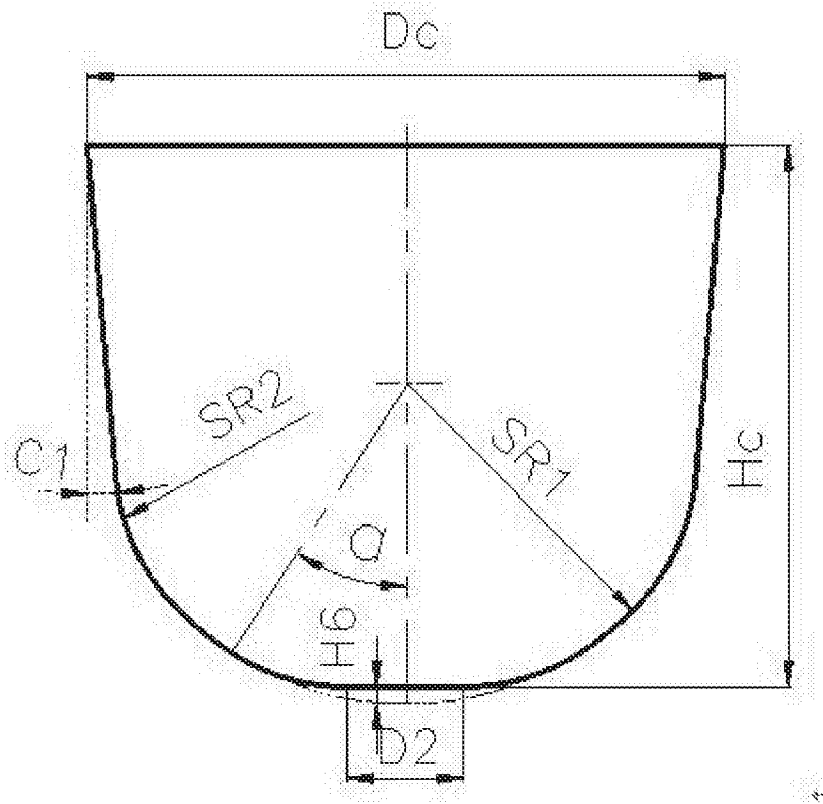


图10

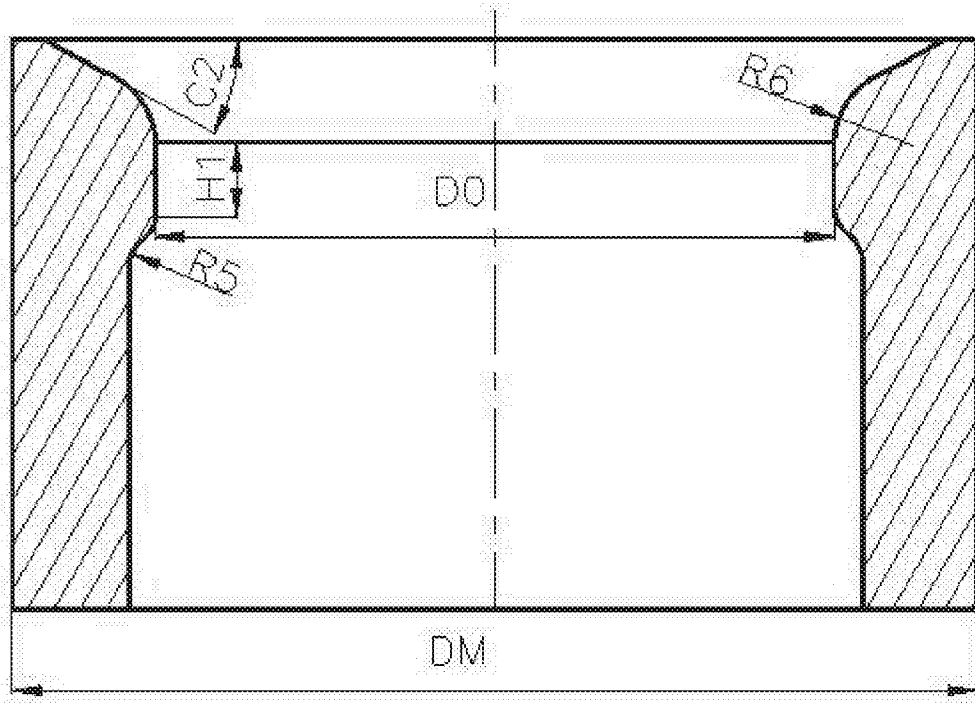


图11

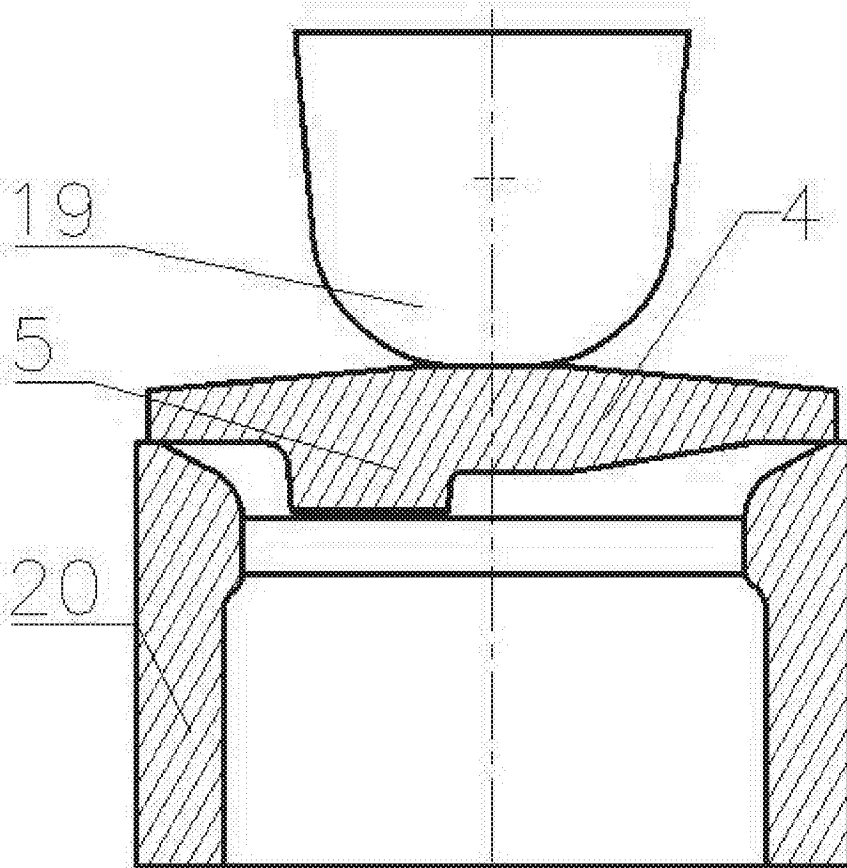


图12

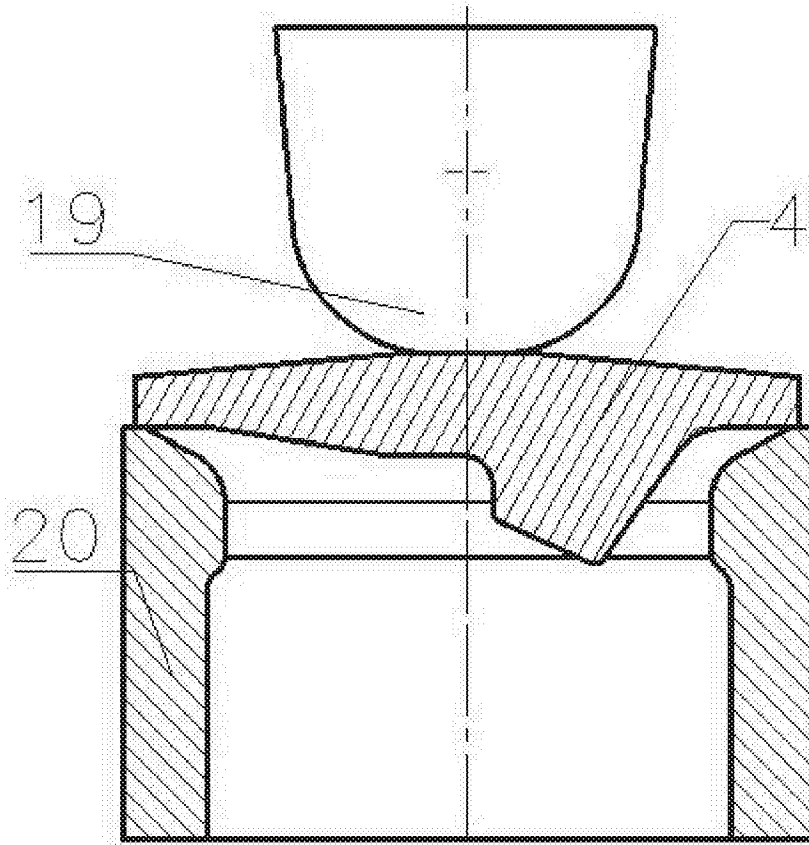


图13

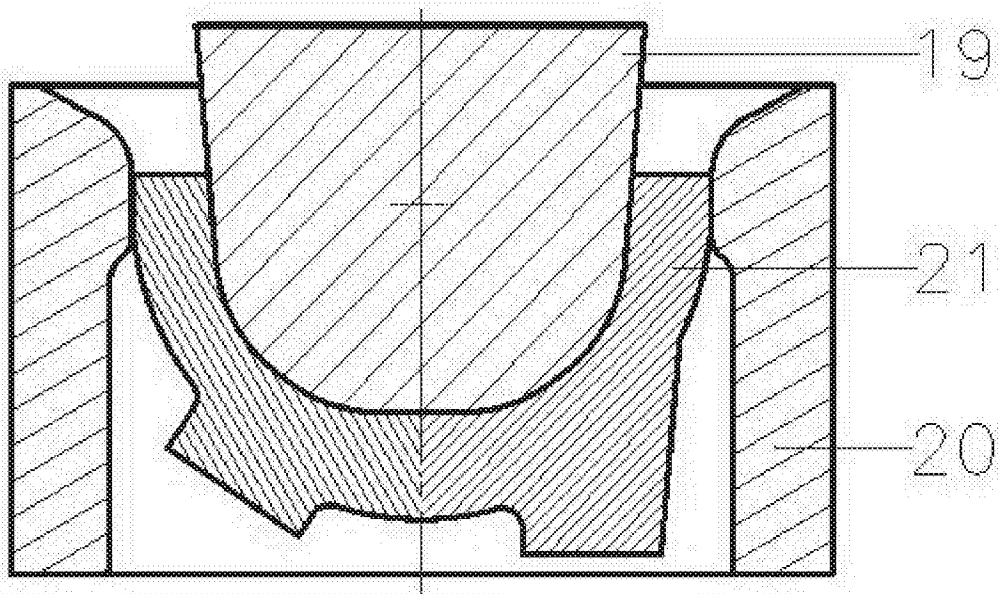


图14