



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117123716 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 28

(21) 申请号 202311310634.2

(22) 申请日 2023.10.10

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西  
大直街92号

(72) 发明人 袁林 钱炳伟 张子健 陈思杰  
单德彬 郭斌

(74) 专利代理机构 哈尔滨工业大学专利中心  
23200

专利代理师 吴婷

(51) Int. Cl.

B21J 13/02 (2006.01)

B21J 5/02 (2006.01)

B21J 1/06 (2006.01)

B21K 1/36 (2006.01)

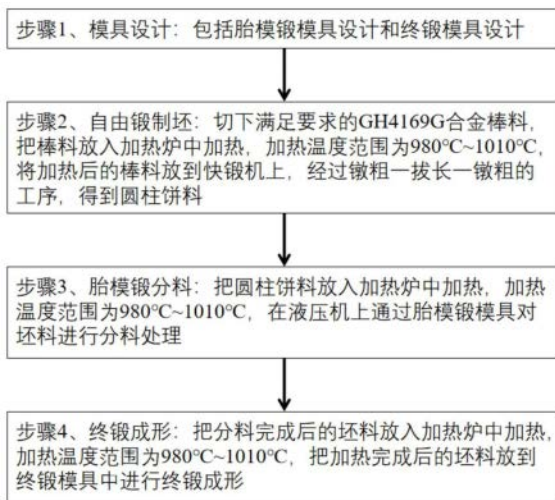
权利要求书2页 说明书6页 附图9页

(54) 发明名称

一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法

(57) 摘要

本发明涉及锻造技术领域,尤其涉及一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法。本发明包含以下步骤:步骤1、模具设计,包括胎模锻和终锻模具设计;步骤2、自由锻制坯,按照锻件锻造所需体积,切下满足要求的棒料,把棒料加热,加热温度范围为980℃~1010℃,将加热后的棒料放到快锻机上,经过锻粗—拔长—锻粗的工序,得到圆柱饼料;步骤3、胎模锻分料,把圆柱饼料加热,加热温度范围为980℃~1010℃,在液压机上通过胎模锻对坯料进行分料处理;步骤4、终锻成形,把分料完成后的坯料加热,加热温度范围为980℃~1010℃,把加热后的坯料放到终锻模具中进行终锻成形。通过上述方法,解决了外宽内高整体叶盘锻件在热模锻过程中出现的折叠缺陷、粗晶组织、成形载荷大等问题。



1. 一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,镍基高温合金的材料牌号是GH4169G,所述镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法是按以下步骤进行的:

步骤1、模具设计

对胎模锻模具和终锻模具进行设计;

步骤2、自由锻制坯

步骤2-1下料,按照整体叶盘锻件锻造所需的体积,切下满足要求的GH4169G合金棒料;

步骤2-2把GH4169G合金棒料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~1010℃;

步骤2-3将加热后的棒料放到快锻机上,经过镦粗—拔长—镦粗的工序,得到圆柱饼料;

步骤3、胎模锻分料

步骤3-1把圆柱饼料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~1010℃;

步骤3-2在液压机上通过胎模锻模具对坯料进行分料处理,使胎模锻坯料与终锻模具内壁处契合;

步骤4、终锻成形

步骤4-1把分料完成后的坯料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~1010℃;

步骤4-2把加热完成后的坯料放到终锻模具中进行终锻成形。

2. 根据权利要求1所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述整体叶盘锻件包括整体叶盘外壁(1)、整体叶盘内壁(2)和整体叶盘中心(3),整体叶盘锻件外壁宽、内壁高。

3. 根据权利要求2所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述整体叶盘外壁(1)的宽度范围:52.8~79.2mm,高度范围:37.2~55.8mm;整体叶盘内壁(2)的宽度范围:44.8~67.2mm,高度范围:71.6~107.4mm。

4. 根据权利要求1所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述步骤1中,胎模锻模具包括胎模锻上模(4)和胎模锻下模(5),胎模锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面;以分模面之上的锻件部分的形状、尺寸设计胎模锻上模(4)锥形,之后将胎模锻上模(4)成形内壁型腔最外端底部与胎模锻上模(4)型腔最外端底部相连,成一斜面,并在斜面与内壁外侧过渡处倒圆角;沿胎模锻上模(4)成形中心部分的外沿一周切除一部分,使胎模锻上模(4)内壁能够预先储料;胎模锻上模(4)中心还设有一圆柱凸头;胎模锻下模(5)为平砧。

5. 根据权利要求1所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述步骤1中,终锻模具根据所述锻件的形状、尺寸进行设计,终锻模具包括终锻上模(6)和终锻下模(7),终锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面;终锻上模(6)有一中心凸头,在凸头中心部位设有终锻上模中心通孔(8)。

6. 根据权利要求1所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述步骤2-1中,GH4169G合金棒料的体积是整体叶盘锻件体积的120%~130%。

7. 根据权利要求1所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特

征在于,所述步骤2-3中,快锻机的下压速度为8~15mm/s。

8.根据权利要求4所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述步骤3-2中胎模锻上下模具温度控制在300℃~340℃内,模具下压速度为3~5mm/s;当胎模锻上模(4)成形内壁型腔将近充满时,胎模锻停止。

9.根据权利要求5所述的一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,其特征在于,所述步骤4-2中终锻上下模具温度为300℃~340℃,模具下压速度为3~5mm/s,当完全填满上下模型腔时,终锻结束;终锻完成后用顶出杆从终锻上模中心通孔(8)处顶出锻件。

## 一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及锻造技术领域,尤其涉及一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,传统的叶盘的分离结构逐渐无法满足航空领域对发动机性能提出的要求,而整体叶盘是将发动机的转子叶片直接和盘一体化,不需要传统的榫头、榫槽及锁紧装置进行连接,使发动机的结构变得简单,这种新型的结构件能满足高性能航空发动机的要求。发动机是所有现代航空装备的心脏,其高温使用性能至关重要,因此对整体叶盘锻件的质量要求极高。GH4169G合金是在GH4169合金基础上改变了磷和硼元素含量而研制的一种镍基高温合金,主要用于制造航空发动机叶盘、轴颈及低压涡轮盘等零件。P、B元素的增加改变了其蠕变性能,使GH4169G合金的长期使用温度达到了690℃左右。由于元素的改变,成形性能和晶粒尺寸演变的情况与GH4169以及GH4169D有所不同,因此制造无明显锻造缺陷的GH4169和GH4169D锻件并控制晶粒度的成形方法并不能直接应用在GH4169G锻件上。

[0003] 传统的GH4169G合金盘类锻件锻造方法合格率较低,原因往往是局部出现锻造缺陷或者锻后的晶粒度和组织达不到合格要求。近年提出的等温模锻工艺虽然能成形质量良好的整体叶盘,但工艺成本高,长时间高温加热导致模具寿命低,并且生产效率低,热模锻在这些方面往往要优于等温模锻。一类外壁宽内壁高形成的类似两道阶梯形状的整体叶盘锻件在热模锻成形过程中,如果按照传统方法直接一次成形,内壁处容易出现严重折叠,损害产品质量,导致报废。同时由于该类锻件中心处往往有一通孔,直接锻造会出现锻造连皮,此处金属流动困难,锻造载荷往往因为连皮出现而急剧增大。如何在热模锻中使用小的设备载荷来成形无折叠等缺陷的该类叶盘锻件,同时保证锻件的晶粒尺寸合格是一个关键的技术问题。

### 发明内容

[0004] 为解决一类外壁宽内壁高的GH4169G整体叶盘锻件在热模锻过程中出现折叠缺陷、粗晶组织、成形载荷大等问题,本发明结合Deform模拟软件提出了一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,采用的技术方案如下:

[0005] 一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,镍基高温合金的材料牌号是GH4169G,所述镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法是按以下步骤进行的:

[0006] 步骤1、模具设计

[0007] 对胎模锻模具和终锻模具进行设计;

[0008] 步骤2、自由锻制坯

[0009] 步骤2-1下料,按照整体叶盘锻件锻造所需的体积,切下满足要求的GH4169G合金棒料;

[0010] 步骤2-2把GH4169G合金棒料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~

1010℃;

[0011] 步骤2-3将加热后的棒料放到快锻机上,经过镦粗—拔长—镦粗的工序,得到圆柱饼料;

[0012] 步骤3、胎模锻分料

[0013] 步骤3-1把圆柱饼料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~1010℃;

[0014] 步骤3-2在液压机上通过胎模锻模具对坯料进行分料处理,使胎模锻坯料与终锻模具内壁处契合;

[0015] 步骤4、终锻成形

[0016] 步骤4-1把分料完成后的坯料放入加热炉中加热,加热炉加热温度范围为980℃~1010℃;

[0017] 步骤4-2把加热完成后的坯料放到终锻模具中进行终锻成形。

[0018] 进一步的,所述整体叶盘锻件包括整体叶盘外壁1、整体叶盘内壁2和整体叶盘中心3,整体叶盘锻件外壁宽、内壁高。

[0019] 进一步的,所述整体叶盘外壁1的宽度范围:52.8~79.2mm,高度范围:37.2~55.8mm;整体叶盘内壁2的宽度范围:44.8~67.2mm,高度范围:71.6~107.4mm。

[0020] 进一步的,所述步骤1中,胎模锻模具包括胎模锻上模4和胎模锻下模5,胎模锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面;以分模面之上的锻件部分的形状、尺寸设计胎模锻上模4锥形,之后将胎模锻上模4成形内壁型腔最外端底部与胎模锻上模4型腔最外端底部相连,成一斜面,并在斜面与内壁外侧过渡处倒圆角;沿胎模锻上模4成形中心部分的外沿一周切除一部分,使胎模锻上模4内壁能够预先储料;胎模锻上模4中心还设有一圆柱凸头;胎模锻下模5为平砧。

[0021] 所述步骤1中,终锻模具根据所述锻件的形状、尺寸进行设计,终锻模具包括终锻上模6和终锻下模7,终锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面;终锻上模6有一中心凸头,在凸头中心部位设有终锻上模中心通孔8。

[0022] 进一步的,所述步骤2-1中,GH4169G合金棒料的体积是整体叶盘锻件体积的120%~130%。

[0023] 进一步的,所述步骤2-3中,快锻机的下压速度为8~15mm/s。

[0024] 进一步的,所述步骤3-2中胎模锻上下模具温度控制在300℃~340℃内,模具下压速度为3~5mm/s;当胎模锻上模4成形内壁型腔将近充满时,胎模锻停止。

[0025] 进一步的,所述步骤4-2中终锻上下模具温度为300℃~340℃,模具下压速度为3~5mm/s,当完全填满上下模型腔时,终锻结束;终锻完成后用顶出杆从终锻上模中心通孔8处顶出锻件。

[0026] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:通过胎模锻分料解决了该类整体叶盘锻件在一次锻造过程中极易出现的折叠以及充填困难问题;通过设计终锻模具降低终锻成形载荷,省略了去除锻造连皮的步骤;基于大量动态热模拟实验对胎模锻和终锻温度进行设计,解决了该类锻件的粗晶问题。最终获得的锻件充填饱满,无折叠等锻造缺陷,同时晶粒尺寸满足使用要求。为解决目前这类GH4169G整体叶盘锻造载荷大,一次成形容易出现折叠、充不满等锻造缺陷以及粗晶等问题提供了一种方法。

**附图说明**

- [0027] 图1为镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠成形方法的流程示意图。
- [0028] 图2为具体实施方式一的步骤1中的GH4169G整体叶盘三维结构示意图。
- [0029] 图3为具体实施方式一的步骤1中的GH4169G整体叶盘各部位示意图。
- [0030] 图4为具体实施方式一的步骤1中的胎模锻模具二维截面示意图。
- [0031] 图5为具体实施方式一的步骤1中的胎模锻上模的三维示意图。
- [0032] 图6为具体实施方式一的步骤1中终锻模具二维截面示意图。
- [0033] 图7为具体实施方式一的步骤1中终锻上模的三维示意图。
- [0034] 图8为具体实施方式一的步骤1中终锻下模的三维示意图。
- [0035] 图9为具体实施方式一的步骤2中自由锻后坯料的三维示意图。
- [0036] 图10a为具体实施方式一的步骤3中不采用胎模锻分料锻件折叠产生的初期状态二维示意图。
- [0037] 图10b为具体实施方式一的步骤3中不采用胎模锻分料锻件折叠产生的中间状态二维示意图。
- [0038] 图10c为具体实施方式一的步骤3中不采用胎模锻分料锻件折叠产生的最终状态二维示意图。
- [0039] 图11为具体实施方式一的步骤3中不采用胎模锻分料锻件产生的折叠以及锻造连皮具体位置示意图。
- [0040] 图12为具体实施方式一中采用胎模锻分料后终锻过程中锻件内壁及外壁处金属充填流动示意图。
- [0041] 图13为具体实施方式一的步骤3中胎模锻分料后局部坯料二维示意图。
- [0042] 图14为具体实施方式一的步骤3中胎模锻完成后的坯料二维截面示意图。
- [0043] 图15a为具体实施方式一的步骤4中终锻前坯料中心连皮及点的位置示意图。
- [0044] 图15b为具体实施方式一的步骤4中终锻后中心部位连皮及点的位置变化示意图。
- [0045] 图16为实施例一的步骤1中的GH4169G整体叶盘锻件尺寸示意图。
- [0046] 图17为实施例一的步骤1中的胎模锻上模的二维尺寸示意图。
- [0047] 图18为实施例一的步骤4中终锻完成后的锻件二维截面示意图。
- [0048] 图19为实施例一步骤4中的终锻载荷示意图。
- [0049] 图20为实施例一步骤4中终锻完成后的平均晶粒尺寸分布图。
- [0050] 图21为具体实施方式二的步骤4中的终锻载荷示意图。
- [0051] 附图标记:1—整体叶盘外壁
- [0052] 2—整体叶盘内壁
- [0053] 3—整体叶盘中心
- [0054] 4—胎模锻上模
- [0055] 5—胎模锻下模
- [0056] 6—终锻上模
- [0057] 7—终锻下模
- [0058] 8—终锻上模中心通孔

## 具体实施方式

[0059] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0060] 具体实施方式一:本实施方式为一种镍基高温合金整体叶盘锻件控制折叠的成形方法,如图1-图15b所示,具体按以下步骤进行:

[0061] 步骤1、模具设计

[0062] 模具设计包括对胎模锻模具和终锻模具进行设计。

[0063] 如图2-图3所示,一种典型的整体叶盘锻件,包括整体叶盘外壁1、整体叶盘内壁2和整体叶盘中心3,整体叶盘锻件外壁宽、内壁高。整体叶盘外壁1的宽度范围:52.8~79.2mm,高度范围:37.2~55.8mm;整体叶盘内壁2的宽度范围:44.8~67.2mm,高度范围:71.6~107.4mm。

[0064] 如图4-图5所示,整体叶盘胎模锻模具包括胎模锻上模4和胎模锻下模5,胎模锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面。以分模面之上锻件部分的形状、尺寸设计胎模锻上模4锥形,胎模锻上模4有内壁型腔,内壁型腔最外端底部如图4中a所示,胎模锻上模型腔最外端底部如图4中b所示,胎模锻上模内壁型腔外侧如图4中c所示;将胎模锻上模4内壁型腔最外端底部与胎模锻上模4型腔最外端底部相连,成一斜面,并在斜面与内壁外侧过渡处倒圆角,避免过锐导致金属被割裂。由于内壁内圆角处较难充填,沿胎模锻上模4成形中心部分的外沿一周切除一部分,使得胎模锻上模4内壁能够预先储料。胎模锻上模4中心还设有一圆柱凸头。胎模锻下模5为平砧。

[0065] 如图6-图8所示,整体叶盘终锻模具也是根据该类锻件的形状及尺寸进行设计,终锻模具包括终锻上模6和终锻下模7。终锻模具以整体叶盘锻件的中心处底面为分模面。终锻上模6有一中心凸头,在凸头中心部位设有终锻上模中心通孔8。该通孔直径合适时,有利于成形过程中锻造连皮部位的金属流动,降低成形载荷,同时也省去了胎模锻后去除锻造连皮的工步,节约成本。当终锻上模中心通孔8直径过大时,锻造过程废料增加,锻件内壁及外壁部分可能充填不满;当终锻上模中心通孔8直径过小时,锻造载荷增大。

[0066] 步骤2、自由锻制坯

[0067] 通过UG软件测得该锻件的体积,以该体积的130%切出相应的GH4169G合金棒料。

[0068] 把合金棒料放入加热炉中加热,加热温度为980℃~1010℃。将加热后的棒料放到快锻机上经过镦粗—拔长—镦粗工序,得到圆柱饼料,如图9所示,其中快锻机的下压速度为8~15mm/s。

[0069] 步骤3、胎模锻分料

[0070] 把圆柱饼料放入加热炉中加热,加热温度为980℃~1010℃。把加热完成后的圆柱饼料放到胎模锻模具上进行分料操作。

[0071] 通过胎模锻分料控制折叠、充不满缺陷的机理:

[0072] 如果不采用胎模锻分料,直接用圆饼坯料进行终锻,中部圆环外上圆角处会将坯料流动分成两部分,一部分朝向外壁方向,一部分朝向内壁方向,随着上模具继续下压,朝向内壁方向的料会与后来填充方向的料产生严重折叠,折叠产生过程的二维示意图如图10a,图10b,图10c所示,图中的箭头为金属流动方向,产生的折叠如图10b、图10c中的d处所示。图11中e和f处即产生折叠及锻造连皮在锻件中的具体位置。同时整体叶盘在内壁及外

壁处成形所需要的料相对更多,不进行胎模锻分料这部分充填困难,进而需要更大的设备载荷来帮助充填。

[0073] 采用胎模锻分料后,胎模锻坯料能与终锻模具内壁处契合,继续下压则内壁内部的金属流向只会朝一个方向,充填过程示意图如图12所示。结果表明胎模锻分料能够有效解决折叠以及部分位置充填困难的问题。

[0074] 胎模锻的具体过程如下:胎模锻上下模具温度控制在 $300^{\circ}\text{C} \sim 340^{\circ}\text{C}$ 内,模具下压速度为 $3 \sim 5\text{mm/s}$ 。当胎模锻上模4成形内壁型腔将近充满时,胎模锻停止。具体得到的胎模锻坯料如图13和图14所示。

[0075] 步骤4、终锻成形

[0076] 把分料完成后的坯料放入加热炉中加热,加热温度为 $980^{\circ}\text{C} \sim 1010^{\circ}\text{C}$ 。将加热完成后的坯料放到终锻模具中进行终锻成形。

[0077] 胎模锻完成后,无需去除中心部分的连皮即可进行终锻。原因是终锻上模中心通孔8提供了金属的流动通道,就算连皮与之后流动的金属产生折叠,这部分金属也会通过终锻上模中心通孔8流出,通过模拟进行点数据追踪也可以验证,具体如图15a和图15b所示。并且锻件自身中心处为一通孔,最后的终锻件需要机加工去除锻造连皮,因此不去除坯料的锻造连皮并不会对终锻件本身的质量产生影响。

[0078] 将分料后的坯料放入终锻模具进行终锻成形,终锻上下模具温度为 $300^{\circ}\text{C} \sim 340^{\circ}\text{C}$ ,模具下压速度为 $3 \sim 5\text{mm/s}$ ,当完全填满上下模型腔时,终锻结束。由于终锻上模6内腔较终锻下模7内腔更深,并且凸头中心处有终锻上模中心通孔8,终锻件往往卡在终锻上模6,可将终锻上模中心通孔8流出的金属切除,用顶出杆从该通孔顶出锻件。

[0079] 模拟结果表明设备载荷降低,锻件充填饱满,无成形缺陷,晶粒尺寸满足使用要求。

[0080] 具体实施方式二:本实施方式与具体实施方式一不同的是:步骤4中所述的坯料加热温度为 $1010^{\circ}\text{C}$ 。其他与具体实施方式一相同,终锻载荷如图21所示。

[0081] 以下结合实施例对具体实施方式一进行说明。

[0082] 实施例一

[0083] 如图5-图20所示,具体按以下步骤进行:

[0084] 步骤1模具设计:

[0085] 一种典型的外壁宽内壁高GH4169G整体叶盘锻件,整体叶盘外壁1最外端达到的直径为 $640\text{mm}$ ,整体叶盘内壁2最外端达到的直径为 $574\text{mm}$ ,整体叶盘外壁1的高度为 $46.5\text{mm}$ ,整体叶盘内壁2的高度为 $89.5\text{mm}$ 。

[0086] 胎模锻模具根据锻件的尺寸进行设计,锻件的尺寸如图16所示,胎模锻上模4的二维尺寸如图17所示,以整体叶盘锻件中心处底面为分模面,胎模锻上模4型腔斜面与内壁外侧过渡处倒半径 $15\text{mm}$ 的圆角。胎模锻上模4中心切除的部分在二维截面上为直角边为 $53.5\text{mm}$ 的等腰直角三角形。胎模锻上模4中心凸头为直径 $110\text{mm}$ ,高度 $24\text{mm}$ 的圆柱。胎模锻上模4的三维图如图5所示。胎模锻下模5为平砧。

[0087] 终锻模具也根据锻件尺寸进行设计,锻件的尺寸如图16所示,同样以整体叶盘锻件中心处底面为分模面,上下模具脱模斜度设为 $1^{\circ}$ 。中心凸头直径为 $114\text{mm}$ ,长度设置为 $30\text{mm}$ ,在凸头中心部位设计一个直径为 $30\text{mm}$ 的终锻上模中心通孔8,终锻模具二维截面如图

6所示,上下模的三维图如图7、图8所示。

[0088] 步骤2自由锻制坯:

[0089] 通过UG软件测得该锻件的体积约为 $1.32 \times 10^7 \text{mm}^3$ ,以该体积的130%切出直径250mm、高350mm的GH4169G棒料。把GH4169G合金棒料放入加热炉中加热,加热温度为1000℃。将加热后的棒料放到快锻机上经过镦粗—拔长—镦粗工序,下压速度为10mm/s,得到直径467mm、高100mm的圆柱饼料。此时通过上述处理后的坯料平均晶粒度为7级。在下一步骤的Deform模拟中,初始晶粒尺寸设置为50 $\mu\text{m}$ 。

[0090] 步骤3胎模锻分料:

[0091] 把圆柱饼料放入加热炉中加热,加热温度为1000℃。把加热完成后的GH4169G圆柱饼料放到胎模锻模具上进行分料操作。

[0092] 胎模锻的具体过程如下:胎模锻上、下模具温度控制在320℃,模具下压速度为5mm/s。当上下模合模距离在20mm时,胎模锻停止。

[0093] 步骤4终锻成形:

[0094] 把分料完成后的坯料放入加热炉中加热,加热温度为1000℃。将加热完成后的坯料放到终锻模具中进行终锻成形。终锻上、下模具温度为320℃,模具下压速度为5mm/s,当上下模距合模6mm时,终锻结束。将终锻上模中心通孔8流出的金属切除,用顶出杆从该通孔顶出锻件。

[0095] 模拟结果表明设备载荷大约为21000吨,锻件充填饱满,无成形缺陷。图18是实施例一终锻完成后的锻件二维截面示意图,图19、图20是实施例一终锻完成后的载荷示意图和平均晶粒尺寸分布图,终锻件的晶粒平均尺寸约为16.3 $\mu\text{m}$ ,晶粒尺寸满足使用要求。

[0096] 本发明已以较佳实施案例揭示如上,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专业的技术人员,在不脱离本发明技术方案范围内,当可以利用上述揭示的结构及技术内容做出些许的更动或修饰为等同变化的等效实施案例,但是凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施案例所做的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属本发明技术方案范围。

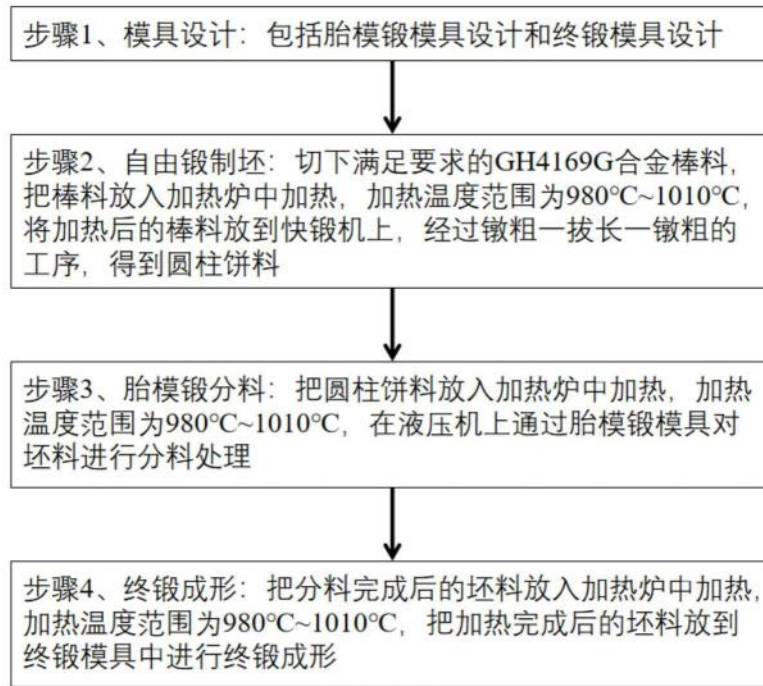


图1

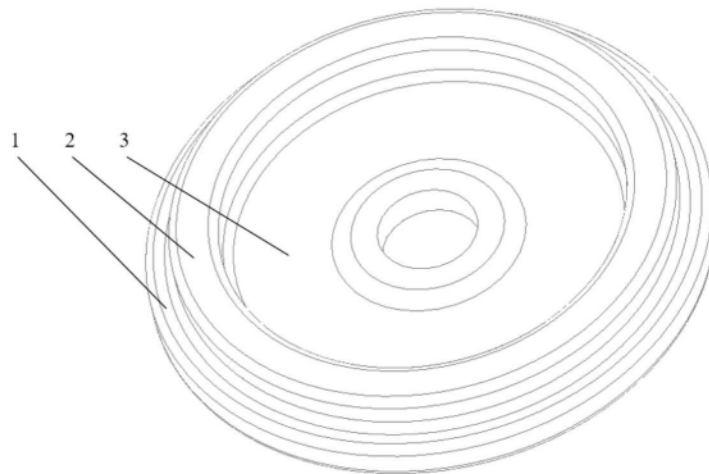


图2

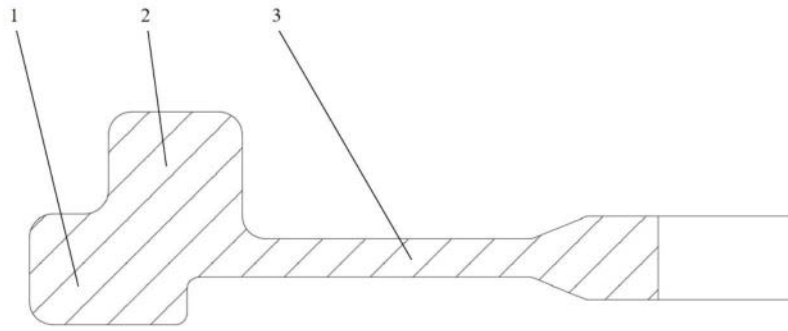


图3

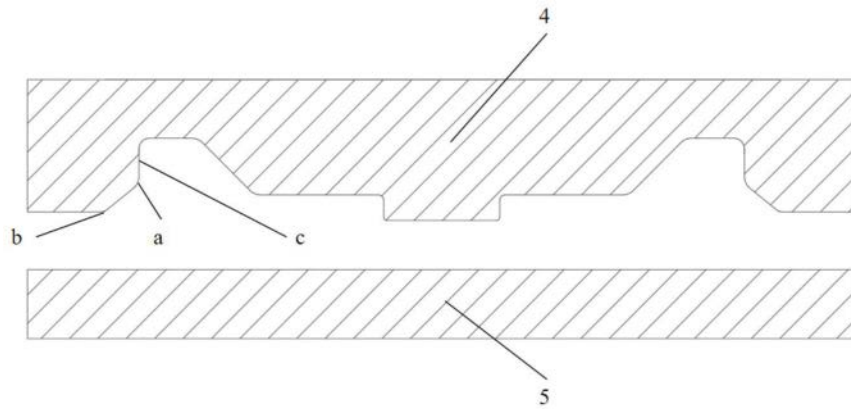


图4



图5

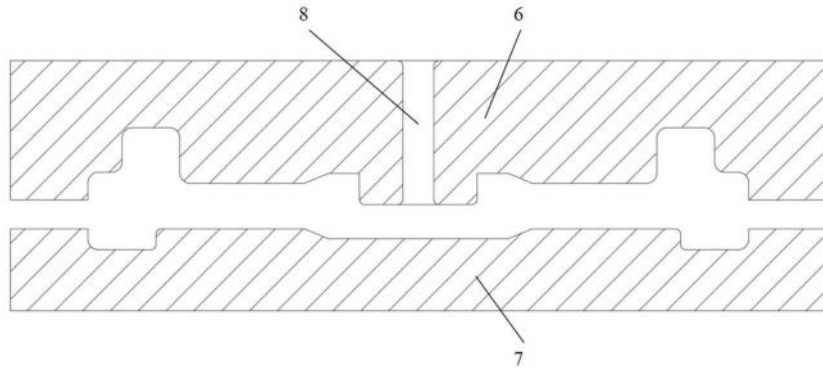


图6



图7



图8

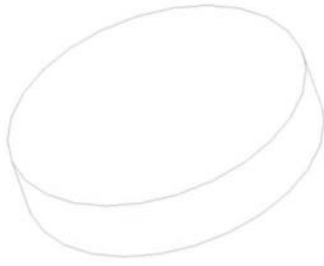


图9

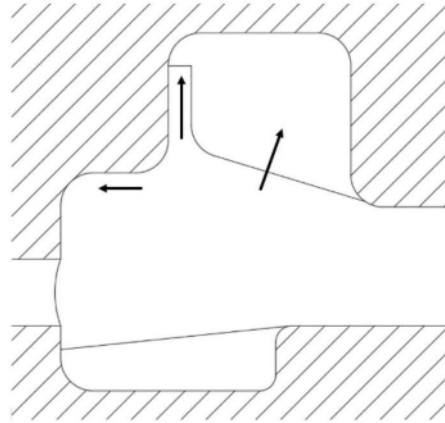


图10a

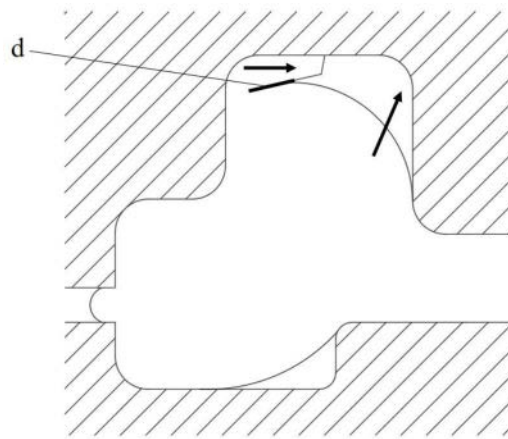


图10b

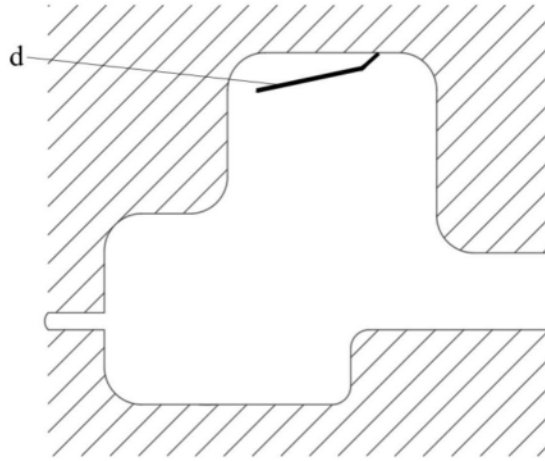


图10c

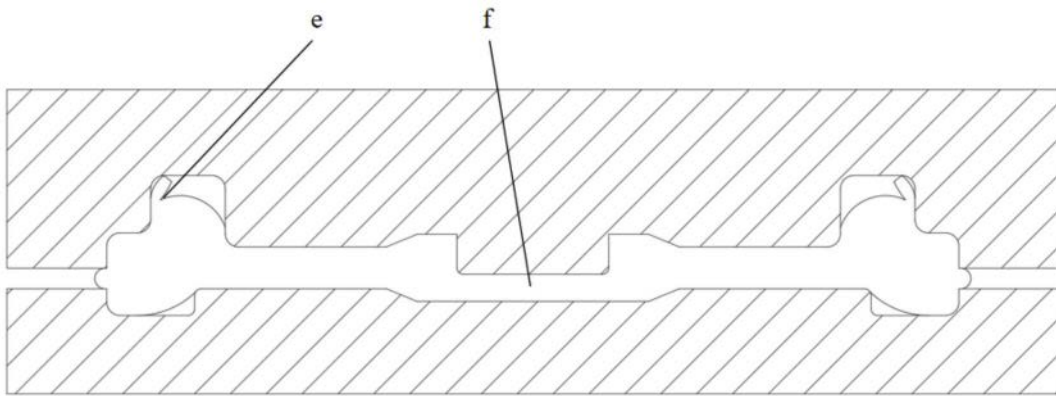


图11

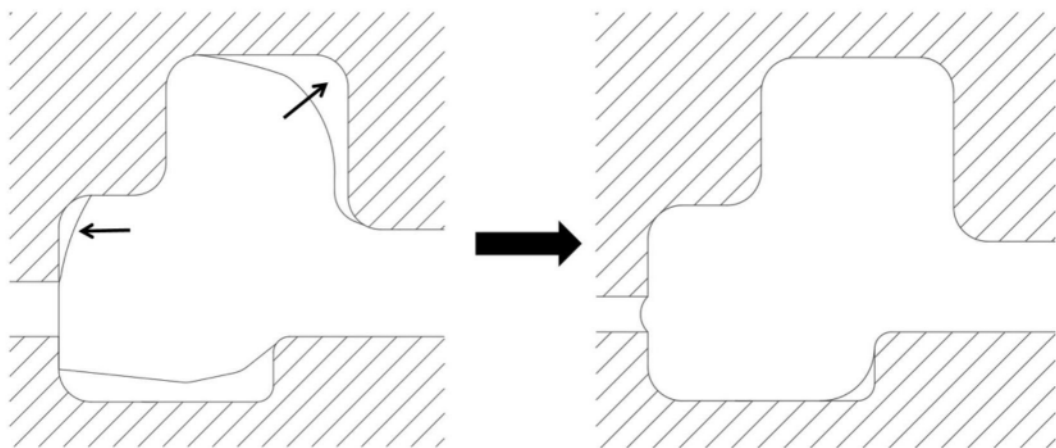


图12

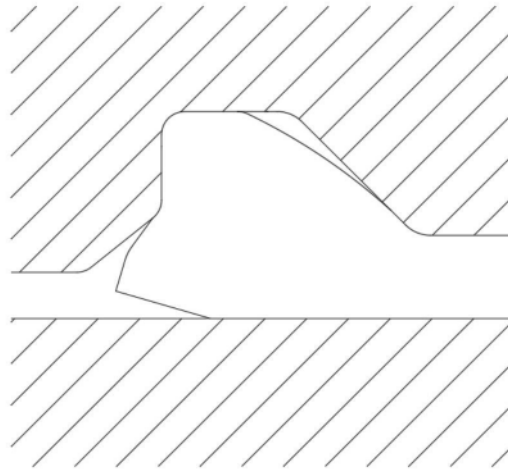


图13



图14

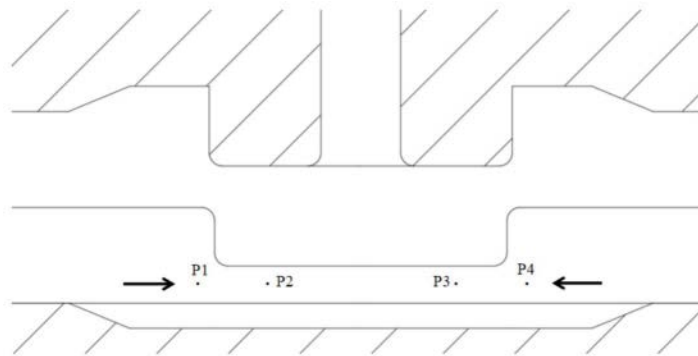


图15a

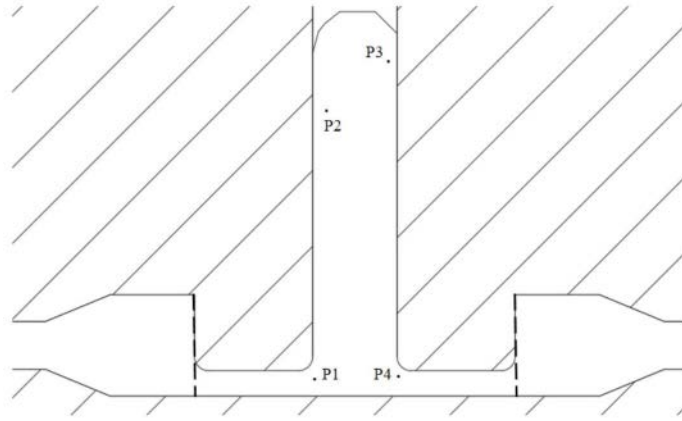


图15b

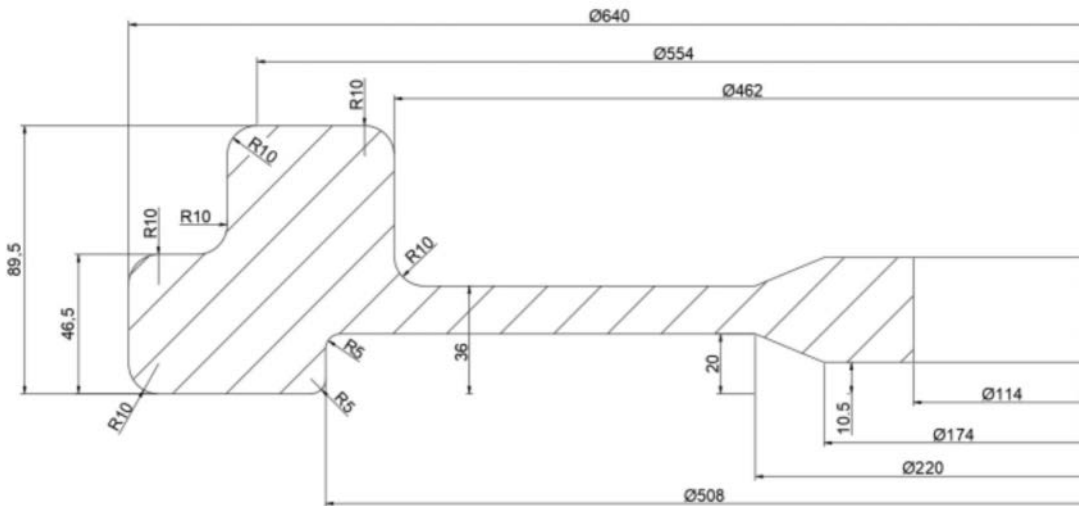


图16

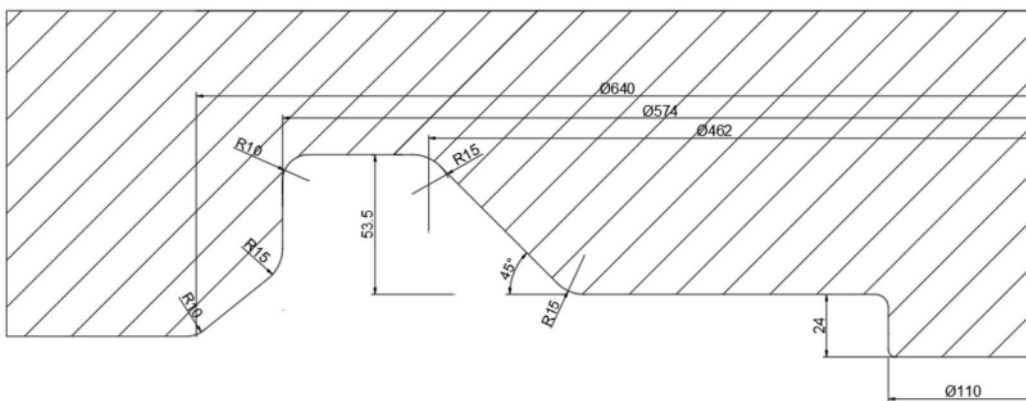


图17

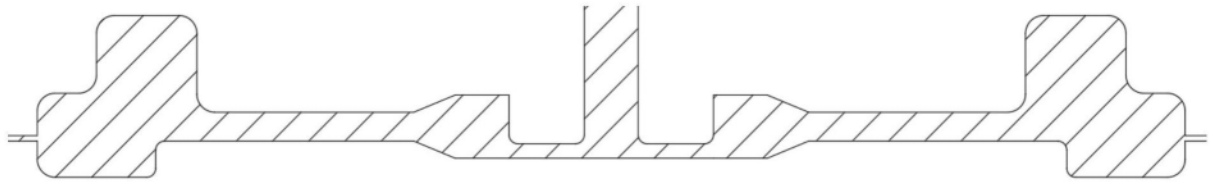


图18

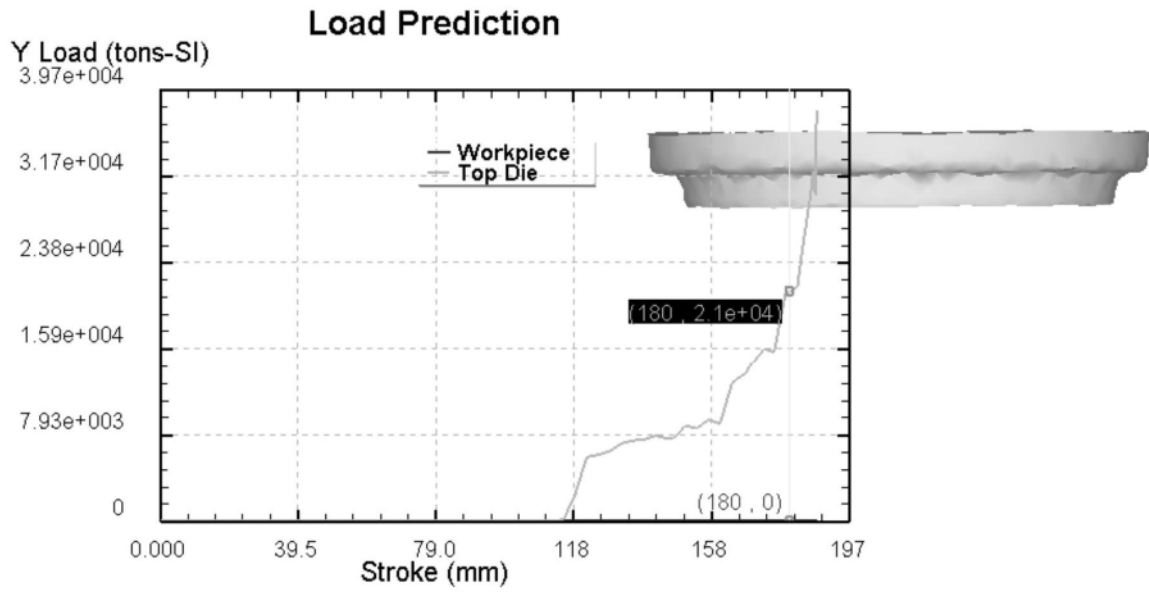


图19

Avrami Grain model - 平均晶粒大小(um)

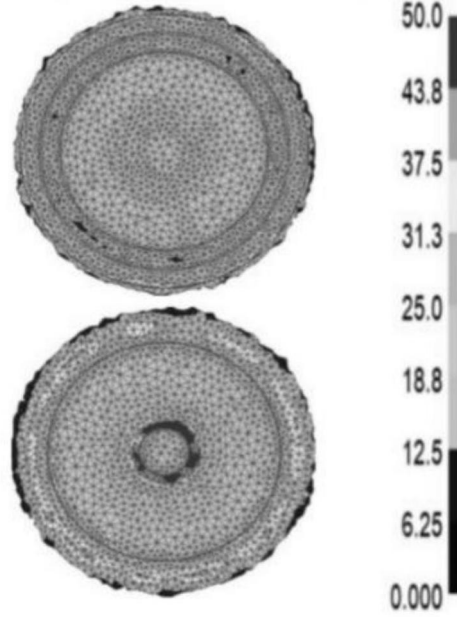


图20

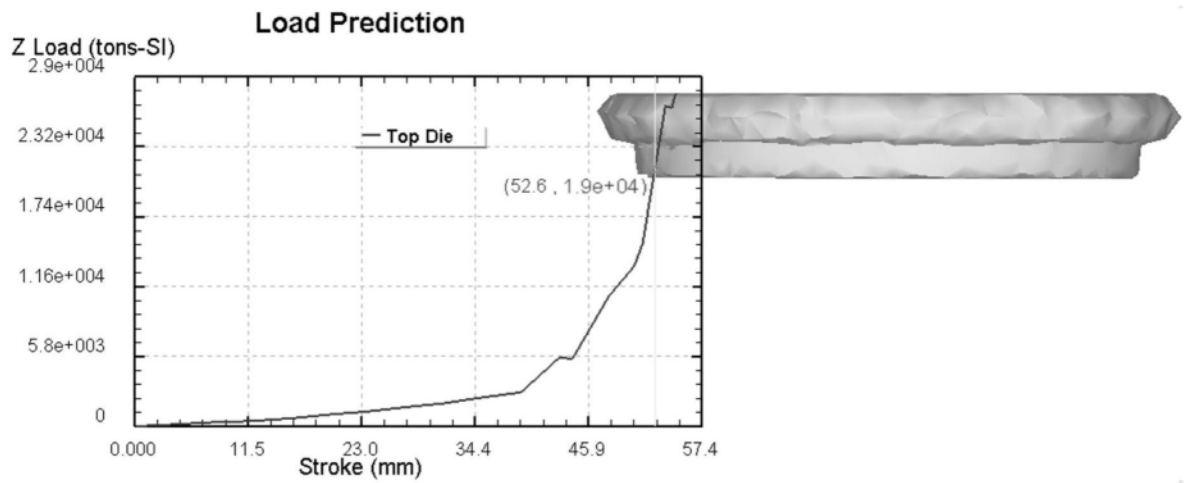


图21