

## 一种 H13 钢端部法兰杯形件成形工艺

张 超<sup>1</sup>, 孙红星<sup>1,2</sup>, 王 涛<sup>1</sup>, 汪金保<sup>3</sup>, 刘光辉<sup>1</sup>, 刘 华<sup>1</sup>

(1. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;  
3. 三一重机有限公司, 江苏 昆山 215300)

**摘要:** 针对 4Cr5MoSiV1 (ASTM H13) 钢在锻造过程中易产生表面裂纹等问题, 以一种 H13 钢的端部法兰杯形锻件为研究对象, 进行成形工艺开发。首先, 通过高温压缩试验获得了 H13 钢的真实应力-真实应变曲线。其次, 结合工艺试验结果, 采用有限元模拟软件 DEFORM-3D 分析了锻造过程中金属的流动规律和应力分布, 探明了试验件裂纹产生的原因, 并提出了控制坯料温度均匀性、改进锻件形状等措施。最后, 通过工艺改进实现了对某型 H13 钢杯形件的试制。试验结果表明: H13 钢小锻件在锻造过程中极易出现裂纹, 要尽量保证坯料温度的均匀性, 控制锻造变形的一致性和接触摩擦条件。该研究对小型 H13 钢端部法兰杯形件的开发和生产具有一定的指导意义。

**关键词:** H13 钢; 端部法兰杯形件; 加热方式; 锻造裂纹; 接触摩擦条件

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.003

**中图分类号:** TG314.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0017-08

## A forming process of end flange cup-shaped part for H13 steel

Zhang Chao<sup>1</sup>, Sun Hongxing<sup>1,2</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Wang Jinbao<sup>3</sup>, Liu Guanghui<sup>1</sup>, Liu Hua<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Sany Heavy Machinery Co., Ltd., Kunshan 215300, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of surface cracks easily occurring during the forging process of 4Cr5MoSiV1 (ASTM H13) steel, for H13 steel end flange cup-shaped forgings, its forming process was developed. Firstly, the true stress-true strain curve of H13 steel was obtained by high temperature compression test. Secondly, combined with the process test results, the flow law and stress distribution of the metal during the forging process were analyzed by finite element simulation software DEFORM-3D. Furthermore, the causes of cracks in the test sample were found out, and the measures such as controlling the temperature uniformity of billet and improving the shape of forgings were proposed. Finally, the trial production of a certain type of H13 steel cup-shaped part was realized through the process improvement. The test results show that H13 steel small forgings is prone to crack during the forging process. It is necessary to ensure the uniformity of billet temperature, control the consistency of forging deformation and the contact friction conditions, which has certain guiding significance for the development and production of small end flange cup-shaped part of H13 steel.

**Key words:** H13 steel; end flange cup-shaped part; heating mode; forging cracks; contact friction conditions

4Cr5MoSiV1 (ASTM H13) 钢是一种综合性能优良的热作模具钢, 广泛应用于制造压铸模、热锻模具和热挤压模具等<sup>[1-2]</sup>。H13 钢的热塑性差, 在锻造过程中易产生不规则的表面裂纹, 所以, 在锻

打时应尽量控制材料变形均匀, 如产生裂纹则及时清除<sup>[3]</sup>。对于小型的 H13 钢材质锻件报道较少, 应进行针对性工艺开发。本文针对端部法兰杯形锻件 H13 钢进行成形工艺开发, 结合有限元模拟软件 DEFORM-3D, 从坯料加热方式、金属流动规律及锻件形状设计等方面进行研究, 以开发该型锻件的成形工艺, 并进行试制。

### 1 H13 钢的真实应力-真实应变曲线

对 H13 钢的高温热变形行为进行研究。将试验材料加工为尺寸为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱体试样。

**收稿日期:** 2023-10-26; **修订日期:** 2024-01-24

**基金项目:** 郑州机械研究所有限公司技术发展基金 (502SJ2023008); 郑州机械研究所有限公司创新创业专项基金 (203SC2022001-16); 郑州市科技重大专项资金 (152PZDX007)

**作者简介:** 张 超 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师

**E-mail:** zc80802@163.com

**通信作者:** 孙红星 (1975-), 男, 博士, 研究员

**E-mail:** sunhx@zrime.com.cn

试样在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行热模拟单向单道次压缩热变形。设计变形温度为 800、900、1000、1100 和 1200  $^{\circ}\text{C}$ ，应变速率为 0.1、1 和 10  $\text{s}^{-1}$ ，变形量为 80%。根据试验得到不同应变速率及不同变形温度下材料的真实应力-真实应变曲线，如图 1 所示。将以上实际检测值导入 DEFORM-

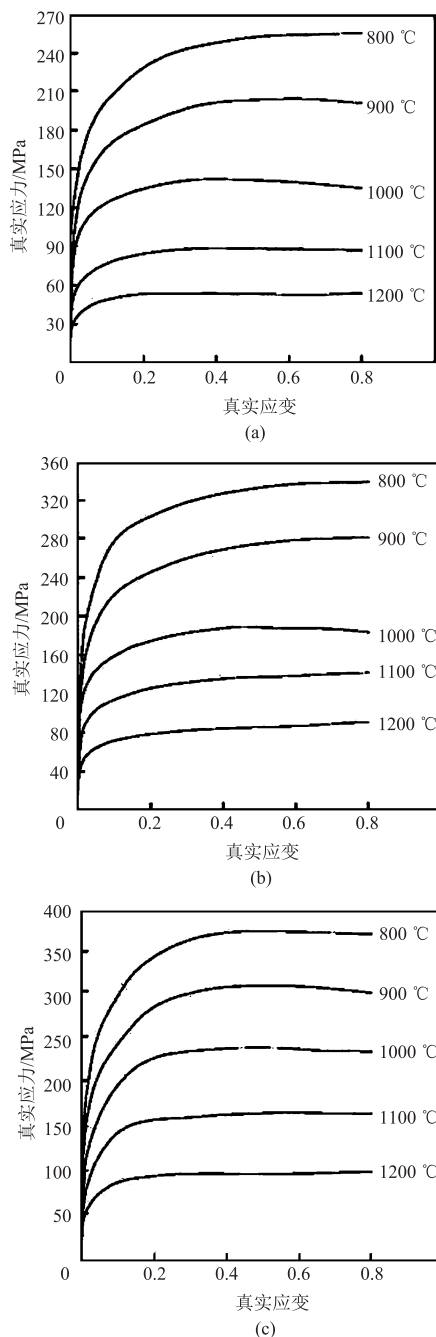


图 1 不同应变速率和变形温度下 H13 钢的真实应力-真实应变曲线

(a) 应变速率为 0.1  $\text{s}^{-1}$  (b) 应变速率为 1  $\text{s}^{-1}$

(c) 应变速率为 10  $\text{s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-strain curves of H13 steel under different strain rates and deformation temperatures

(a) Strain rate of 0.1  $\text{s}^{-1}$  (b) Strain rate of 1  $\text{s}^{-1}$  (c) Strain rate of 10  $\text{s}^{-1}$

3D 软件的材料数据库，建立 H13 钢流变应力数据库，以便后续的模拟计算。

## 2 成形工艺及试验结果

### 2.1 成形工艺

某型带端部法兰杯形锻件如图 2 所示，材质为 H13 钢。制定如下成形工艺方案并进行工艺试验：(1) 下料—加热—挤镦成形，其中，坯料为  $\Phi 68$  mm 的圆棒料，表面加工光亮，如图 3 所示。采用中频感应加热，加热温度为  $(1160 \pm 10) ^{\circ}\text{C}$ 。模具预热至 200  $^{\circ}\text{C}$  左右，使用石墨润滑剂涂抹模具型腔，坯料上端面涂抹适量的玻璃润滑剂。设置对照组试验，材质为 20CrMnTi 钢，其他工艺条件相同。设计专用模具<sup>[4-6]</sup>在 500 t 四柱液压机上进行工艺试验。

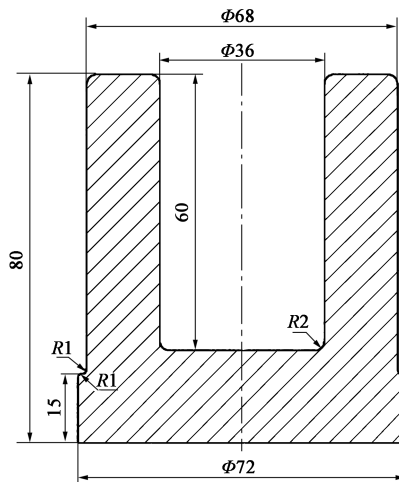


图 2 带端部法兰杯形锻件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cup-shaped forgings with end flange



图 3 圆坯料试验件

Fig. 3 Test sample of round billet

### 2.2 试验结果及分析

制备的试验件实物图如图 4 所示。图 4a 为 20CrMnTi 钢试验件，外表面和内孔处均无裂纹。图

4b 为 H13 钢材质试验件，外表面距底部法兰 4 mm 处出现环周裂纹（裂纹 I）；向上约 15 mm 处出现一条横向裂纹，裂纹长度约为 30 mm（裂纹 II）；试样件内表面未见裂纹。取 H13 钢材质试验件裂纹处进行分析，如图 4c 所示，裂纹 I 的深度约为 2 mm，

与表面呈现约 45° 夹角斜向上方，裂纹两侧金属流线完整未切断；裂纹 II 的深度约为 2.5 mm，靠近外表面处的裂纹宽度约为 2 mm，向内部逐渐变细，裂纹整体与外表面呈现出约 30° 夹角斜向下方，裂纹两侧金属流线被切断。

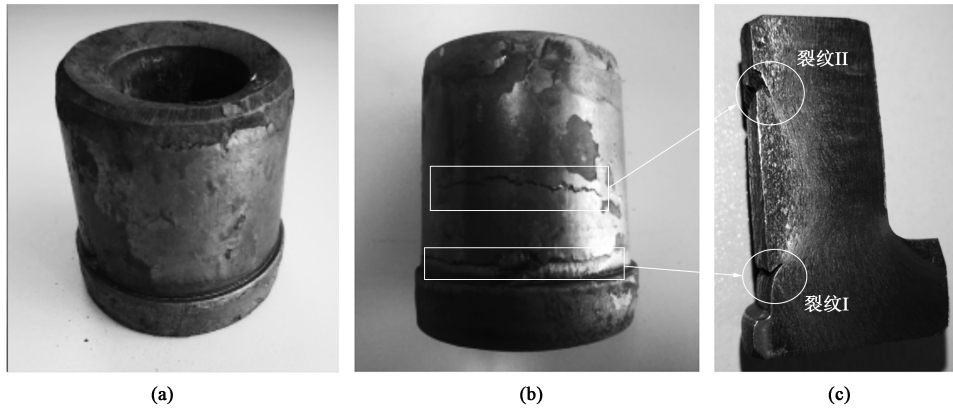


图 4  挤锻成形的试验件  
(a) 20CrMnTi 钢  (b) H13 钢  (c) H13 钢试验件的裂纹区域

Fig. 4  Test samples formed by extrusion and forging  
(a) 20CrMnTi steel  (b) H13 steel  (c) Crack areas of H13 steel test sample

对成形工艺建立有限元模型并进行分析，如图 5 所示。坯料尺寸为  $\Phi 68\text{ mm}\times 68\text{ mm}$ ，冲头运动速度为  $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，坯料的初始温度设为  $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。H13 钢的应力、应变数据通过高温压缩试验获得，20CrMnTi 钢使用资料中的试验数据<sup>[7]</sup>。模拟计算考虑热传导，模具温度设为  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，环境温度恒定并设为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8-11]</sup>；坯料与模具之间的摩擦因数设为  $0.3$ <sup>[12-13]</sup>；网格数量划分为 120000 个，设置步数为 240 步，每步压下量为  $0.2\text{ mm}$ 。

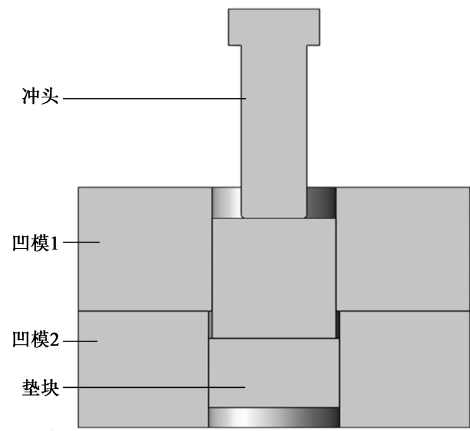


图 5  有限元模型  
Fig. 5  Finite element model

图 6 为第 240 步金属流动速度场分布图。图 6a 和图 6b 分别为 20CrMnTi 钢和 H13 钢的模拟计算结

果，对比图 6a 与图 6b 可知，金属流动规律一致，速度场分布相差不大。同时，结合图 4b 可以看出，裂纹 I 区域位于多股金属流动汇聚区。

图 7 为第 240 步坯料最大主应力分布图。图 7a 为 20CrMnTi 钢材质成形过程中应力分布，最大成形力为  $490\text{ kN}$ ，与工艺试验时实际加载力基本一致，坯料的主应力区出现在端部法兰上方区域，最大主应力为  $334\text{ MPa}$ ；图 7b 为 H13 钢材质成形过程中应力分布，最大成形力为  $666\text{ kN}$ ，与工艺试验时实际加载力基本一致，最大应力区同样出现在法兰上方区域，最大主应力为  $559\text{ MPa}$ ，与 20CrMnTi 钢材质的最大应力区域位置相同。

综上所述，20CrMnTi 钢试验件未出现裂纹，而 H13 钢材质试验件出现两条裂纹。此成形工艺对于 20CrMnTi 钢适用，但对于 H13 钢则需改进。结合计算机模拟结果进一步分析，H13 钢材质试验件的裂纹 I 处为金属流动速度变化较大的交界区，并且在此区域应力水平较高，裂纹与外表面呈现出约  $45^{\circ}$  夹角斜向上方，裂纹两侧金属流线完整未切断。裂纹 I 处可能是由于 H13 钢在锻造过程中金属变形不均匀、温度分布不均匀而发生区域应力集中，最终导致开裂。裂纹 II 处金属流动速度恒定，且方向单一竖直向上，外表面裂纹宽度较宽约为  $2\text{ mm}$ ，向内部逐渐变细，裂纹整体与外表面呈约  $30^{\circ}$  夹角斜向

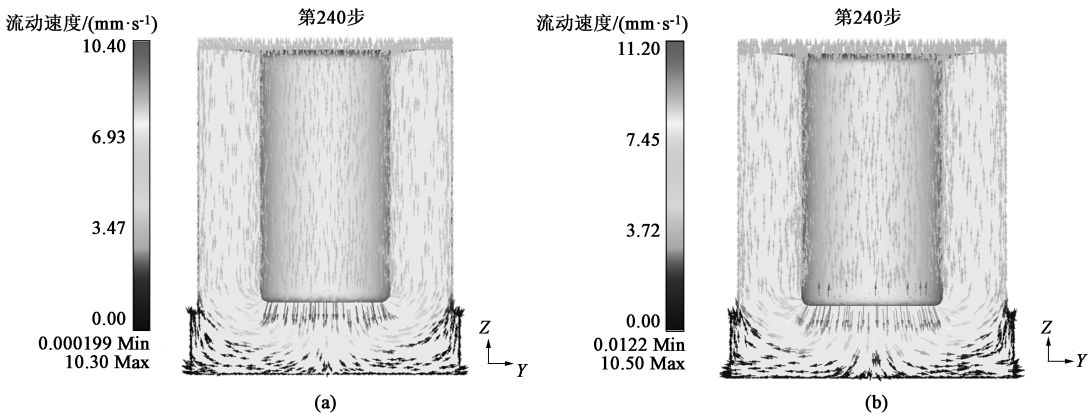


图 6 成形过程中金属流动速度场分布云图  
(a) 20CrMnTi 钢 (b) H13 钢

Fig. 6 Distribution nephograms of metal flow velocity field during forming process  
(a) 20CrMnTi steel (b) H13 steel

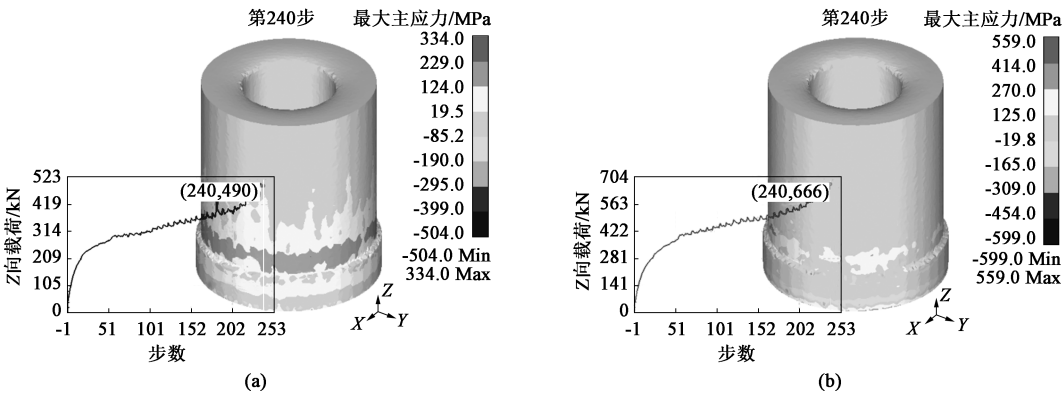


图 7 成形过程中最大主应力分布云图  
(a) 20CrMnTi 钢 (b) H13 钢

Fig. 7 Distribution nephograms of max-principal stress during forming process  
(a) 20CrMnTi steel (b) H13 steel

下方，裂纹两侧金属流线被切断。裂纹Ⅱ可能是由于坯料外表面温度降低后，温度分布不均匀导致金属流动速度不一致而造成外表面撕裂。结合工件形状，底部法兰区域主要为镦粗变形部位，工件在成形过程中，最大成形力出现在法兰镦粗完成后、反挤压成形完成前，实际反挤压冲头并未进入该法兰区域，所以，在法兰与筒体的过渡处如何有效减少金属流动摩擦十分必要。基于以上分析，保证成形过程中坯料各处温度均匀性、改善成形过程中金属流动将有助于产品成形，下一步试验将改进锻件形状、提高初始坯料的温度均匀性。

3 成形工艺改进及试验结果

3.1 成形工艺改进

对锻件形状进行改进，改进后的端部法兰杯形

件锻件如图 8 所示，在法兰与杯形面相交处适当增加过渡区域，内孔底面增加斜度，以便于金属更好

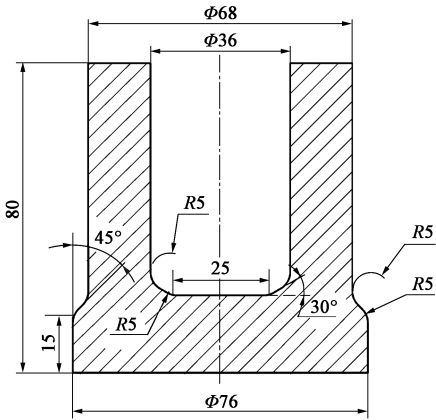


图 8 改进后的带端部法兰杯形锻件示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of improved cup-shaped forgings with end flange



地流动。改进后的成形工艺在第 1 次试验工艺的基础上进行调整，对 H13 钢材质试验件，一组试验件延长中频感应加热时间，另一组试验件采用箱式炉加热。设置对照组，材质为 20CrMnTi 钢，并使用中频感应加热，其他条件相同。设计相应的模具在 500 t 四柱液压机上进行工艺试验。

3.2 试验结果及分析

工艺试验制备的试验件如图 9 所示。为更好地观察试验件表面情况，进行了表面氧化皮清理。图 9a 为 20CrMnTi 钢试验件，外表面和内孔处均无裂

纹，符合技术要求。图 9b 为 H13 钢试验件，加热方式为中频炉加热，外表面距底部法兰 3 mm 处出现环状微裂纹，裂纹长度为 30 mm；试验件内表面未见裂纹，外表面出现裂纹，不符合技术要求。取裂纹处进行分析，如图 9c 所示，裂纹深度约为 0.5 mm，与表面呈约 90°夹角，外表面处裂纹宽度较窄，裂纹两侧金相组织无差别。图 9d 为 H13 钢试验件，加热方式为箱式炉加热，外表面无裂纹，剖切法兰与杯形过渡段，如图 9e 所示，未发现裂纹，符合技术要求。

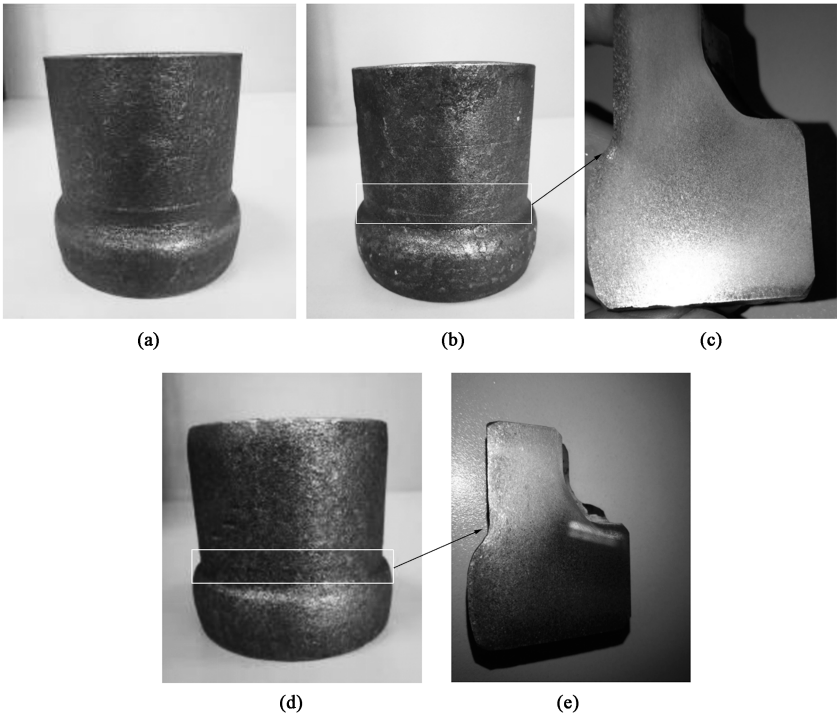


图 9 改进工艺后制备的试验件  
(a) 20 CrMnTi 钢    (b) H13 钢（中频加热）    (c) 图 9b 取样区域    (d) H13 钢（箱式炉加热）    (e) 图 9d 取样区域  
Fig. 9 Test samples prepared by improved forming process  
(a) 20CrMnTi steel    (b) H13 steel (Medium frequency heating)    (c) Sampling area in figure 9b    (d) H13 steel (Box furnace heating)  
(e) Sampling area in figure 9d

建立相应的有限元模型进行分析，设置参数与 2.2 章节中所述相同，模拟计算结果如图 10 所示。

图 11 为第 240 步金属流动速度场分布图。图 11a 和图 11b 分别为 20CrMnTi 钢和 H13 钢的模拟计算结果。可知，两者的金属流动规律一致，速度场分布相差不大。

图 12 为第 240 步最大主应力分布图。图 12a 为 20CrMnTi 钢的最大主应力分布云图，最大成形力为 375 kN，与实际试验时加载力基本一致，坯料的主应力区出现在法兰上方区域，最大主应力为 275 MPa；图 12b 为 H13 钢的最大主应力分布云图，最大成形

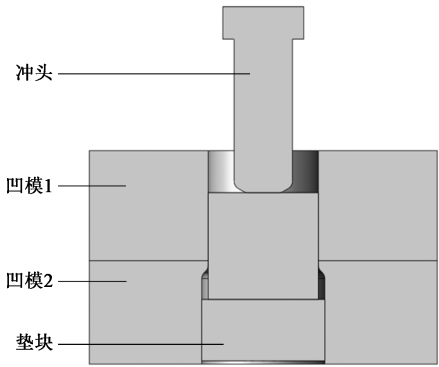


图 10 改进成形工艺后有限元模型  
Fig. 10 Finite element model after improving forming process

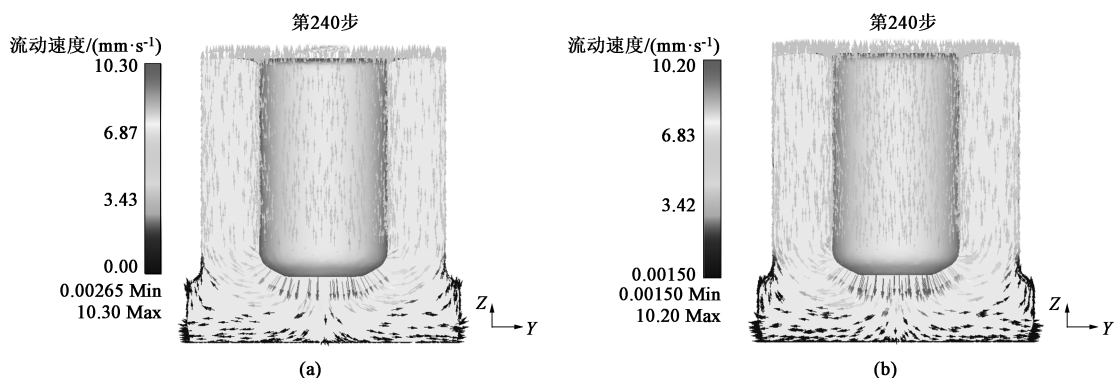


图 11 改进成形工艺后成形过程中金属流动速度场分布云图

(a) 20CrMnTi 钢 (b) H13 钢

Fig. 11 Distribution nephograms of metal flow velocity field during forming process after improving forming process

(a) 20CrMnTi steel (b) H13 steel

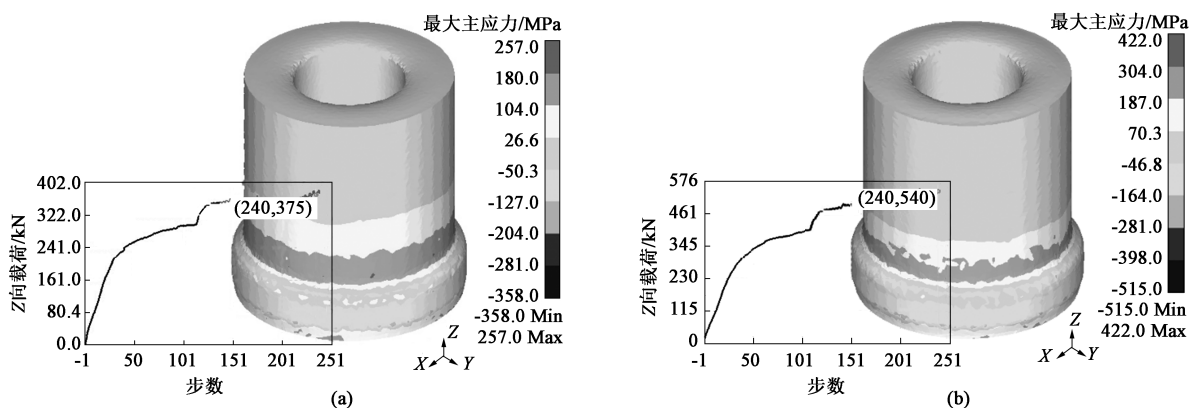


图 12 改进成形工艺后成形过程中最大主应力分布云图

(a) 20CrMnTi 钢 (b) H13 钢

Fig. 12 Distribution nephograms of max-principal stress during forming process after improving forming process

(a) 20CrMnTi steel (b) H13 steel

力为 540 kN，与实际试验时加载力基本一致，最大应力区同样出现在法兰上方区域，与 20CrMnTi 钢材质的最大应力区域位置相同，最大主应力为 422 MPa。

综上所述，20CrMnTi 钢材质试验件未出现裂纹，H13 钢材质的中频感应加热试验件出现 1 条裂纹，箱式炉加热试验件未出现裂纹。H13 钢材质的中频感应加热试验件，外表面距底部法兰 3 mm 处出现 2 条长度约为 30 mm 的环状微裂纹，裂纹处为金属流动速度变化较大的交界区，在此位置应力集中较大。裂纹深度约为 0.5 mm，与表面呈约 90° 夹角，外表面处裂纹的宽度较窄，裂纹两侧金相组织无差别，可能是由于 H13 钢在锻造过程中对金属变形的均匀性及温度较为敏感，导致区域应力集中发生开裂。

#### 4 分析与讨论

通过以上工艺试验及工艺改进，结合 DEFORM-

3D 模拟分析，最终成功实现了 H13 钢材质带端部法兰杯形件的试制。

第 1 次工艺试验，相同的工艺条件下，对照组 20CrMnTi 钢试验件未出现裂纹，H13 钢材质试验件出现两条裂纹，结合模拟分析结果，一条裂纹出现在应力集中区，另一条裂纹出现在外表面金属流动速度稳定区，且方向单一竖直向上，这说明 H13 钢材质对变形均匀性要求较为严格，另外，对于坯料温度、坯料变形过程中接触摩擦条件要求也比较高。

改进成形工艺后再进行试验，在锻件法兰与杯形面相交处适当增加过渡段，内孔底面增加反挤斜度，以便于金属更好地流动。对于 H13 钢材质，在第 1 次工艺试验基础上，一组试验件延长中频感应加热时间，另一组试验件采用箱式炉加热，从而提高初始坯料的温度均匀性。结果显示，对照组 20CrMnTi 钢试验件未出现裂纹，H13 钢材质中频加热试验件出现 1 条微裂纹，箱式炉加热试验件未出现裂纹。H13 钢

材质中频感应加热试验件上的微裂纹,同样出现在应力集中区,但裂纹的形态与第1次工艺试验件不同,裂纹的宽度和深度更小,且长度只有30 mm。结合模拟结果,此处应力集中也由最初的559 MPa降低为422 MPa,说明工艺改进后改善了金属流动、降低了应力集中,并且提高初始坯料的温度均匀性对塑性变形起到了较好的作用。H13钢材质中频感应加热试验件未出现裂纹,进一步说明了坯料初始温度的均匀性对于成形起到了重要的作用。

以上试验实现了对某型H13钢端部法兰杯形件的试制。同时,试验过程也说明了H13钢材质小锻件锻造过程中极易出现裂纹,在锻造变形均匀性、温度分布和接触摩擦条件要求均比较高,设计锻造工艺并试制改进。

## 5 结论

(1) 通过高温热压缩试验得到了H13钢材料的真实应力-真实应变曲线,并通过计算机模拟分析,与试验过程实际加载力基本一致,为工艺试验提供了指导。

(2) 通过工艺试验及改进,采用箱式炉加热坯料至1160℃,优化法兰与杯形外壁过渡段、内部孔底形状,最终实现了对某型H13钢端部法兰杯形件的试制。同时,试验过程表明H13钢材质小锻件锻造过程中极易出现裂纹,要尽量保证坯料温度均匀性,控制锻造变形的一致性、接触摩擦条件。在产品开发过程中,需要进行针对性的工艺开发试制。

### 参考文献:

- [1] 吴晓春,左鹏鹏.国内外热作模具钢发展现状与趋势[J].模具工业,2013,39(10):1-9.  
Wu X C, Zuo P P. Development status and trend of hot working die steels at home and abroad [J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(10): 1-9.
- [2] 刘艳宾,徐数.锻造比对H13模具钢高温性能的影响[J/OL].热加工工艺,1-4[2024-04-22].<https://doi.org/10.141581j.cnki.1001-3814.20223360>.  
Liu Y B, Xu S. Effect of forging ratio on high temperature properties of H13 die steel [J/OL]. Hot Working Technology, 1-4 [2024-04-22]. <https://doi.org/10.141581j.cnki.1001-3814.20223360>.
- [3] 陈国鑫,桑宝光,刘宏伟,等.H13钢高温热变形特征与动态再结晶行为[J].塑性工程学报,2022,29(6):193-202.  
Chen G X, Sang B G, Liu H W, et al. Hot deformation characteristics and dynamic recrystallization behavior of H13 steel at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(6): 193-202.
- [4] 王姝俨,夏华.深孔筒套精密成形工艺及模具设计[J].精密成形工程,2019,8(5):147-151.  
Wang S Y, Xia H. Deep-hole sleeve precision forming technology and die design [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 8(5): 147-151.
- [5] 宋志峰,逯云杰,马磊,等.一种车用法兰盘零件的锻造工艺研究及模具结构优化[J].锻压技术,2023,48(9):15-22.  
Song Z F, Lu Y J, Ma L, et al. Research on forging process and optimization on die structure for an automotive flange part [J]. Forming & Stamping Technology, 2023, 48(9): 15-22.
- [6] 徐伟,万轶,沙鑫美.模具加载方式对传动用螺旋伞齿轮闭式锻造工艺的影响[J].锻压技术,2022,47(6):75-80.  
Xu W, Wan Y, Sha X M. Influence of mold loading mode on closed forging process for transmission spiral bevel gear [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(6): 75-80.
- [7] 杜帅,李颖,李敏,等.H156热作模具钢动态再结晶的实验与数值模拟研究[J].锻压技术,2023,48(1):245-252.  
Du S, Li Y, Li M, et al. Experiment and numerical simulation study on dynamic recrystallization for H156 hot work die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(1): 245-252.
- [8] 李万虎,张敬民.汽车转向球销锻挤成形有限元分析与工艺[J].锻压技术,2023,48(6):115-123.  
Li W H, Zhang J M. Finite element analysis and process on upsetting extrusion for automobile steering ball pin [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(6): 115-123.
- [9] Liu Y, Geng C, Lin Q Q, et al. Study on hot deformation behavior and intrinsic workability of 6063 aluminum alloys using 3D Processing Map [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 713: 212-221.
- [10] 孙世仁,刘虹,陈文琳,等.基于有限元软件的锻造工艺参数对牵引拉杆成形的影响分析[J].热加工工艺,2020,49(15):68-72.  
Sun S R, Liu H, Chen W L, et al. Influence of forging process parameters on forming of traction rod based on finite element software [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(15): 68-72.
- [11] 李传民,王向丽,闫华军,等.金属成形有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2007.  
Li C M, Wang X L, Yan H J, et al. Examples of Metal Forming Finite Element Analysis Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] 尹成波,衣淑丽,孙学进.基于Deform的筒形件冷挤压数值模拟分析[J].热加工工艺,2020,49(3):116-118.  
Yin C B, Yi S L, Sun X J. Numerical simulation analysis of cold extrusion of tube workpieces based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(3): 116-118.
- [13] 于玲,刘清文.基于有限元的法兰轴结构件塑性成形工艺分析[J].精密成形工程,2023,15(2):218-223.  
Yu L, Liu Q W. Plastic forming process of flange shaft structure based on finite element [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(2): 218-223.