

水平两侧带法兰阀体锻件多向模锻工艺

赵文成^{1,2}, 金青林¹, 张 磊^{2,3,4}, 刘 川^{1,3}

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 清华大学天津高端装备研究院, 天津 300300;
3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 4. 清华大学 清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 水平两侧带法兰阀体锻件采用多向模锻工艺生产时, 锻件两侧法兰填充困难, 锻件合格率较低。通过对锻件成形过程进行仿真分析发现, 锻件两侧法兰通过水平冲头挤压方式成形时, 金属首先向模具型腔中心流动, 金属向模具中心的流动阻力增大后, 向法兰模具型腔流动。流向法兰模具型腔的金属与模具的接触时间长, 金属温度下降, 金属流动阻力增大, 造成锻件两侧法兰填充困难。针对此问题, 提出了锻件两端法兰由水平冲头镦粗成形的工艺方案, 金属流动阻力降低, 提高了金属流动性, 阀体锻件两侧法兰填充饱满。阀体锻件批量生产结果验证了水平冲头镦粗成形锻件两侧法兰的工艺方案可行, 锻件生产稳定、可靠, 锻件合格率高。

关键词: 阀体锻件; 法兰; 水平冲头; 挤压; 镦粗

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.010

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 03-0089-06

Multi-directional die forging process of valve body forgings with flanges on both horizontal sides

Zhao Wencheng^{1,2}, Jin Qinglin¹, Zhang Lei^{2,3,4}, Liu Chuan^{1,3}

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin 300300, China;

3. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the valve body forgings with flanges on both horizontal sides were produced using multi-directional die forging process, it was difficult to fill the flanges on both sides of the forgings, and the pass rate of the forgings was relatively low. Through the simulation analysis on the forming process of the forgings, it was found that when the flanges on both sides of the forgings were formed by the extrusion of horizontal punch, the metal first flowed towards the center of die cavity. After the flow resistance of metal towards the center of die increased, it flowed towards the die cavity of flange. The metal flowing to the die cavity of flange had a long contact time, the metal temperature dropped, and the metal flow resistance increased, resulting in the difficulty of flange filling on both sides of the forgings. In view of this problem, the upsetting process scheme of the flanges on both sides of the forgings by the horizontal punch was proposed. The metal flow resistance was reduced, the metal fluidity was improved, and the flanges on both sides of the valve body forgings were fully filled. The batch production results of valve body forgings show that the upsetting process scheme for the flanges on both sides of the forgings by the horizontal punch is feasible, the production of the forgings is stable and reliable, and the qualified rate of the forgings is high.

Key words: valve body forgings; flange; horizontal punch; extrusion; upsetting

多向模锻技术在二十世纪五十年代由美国 Cameron 公司提出, 该技术是一种集挤压和模锻于一体的综合工艺。通过多向模锻工艺可成形无飞边、多

分支或含有内腔的形状复杂的锻件^[1-2]。多向模锻工艺与普通模锻工艺相比, 具有以下优点。

(1) 节约原材料

多向模锻工艺可成形无飞边且带有孔腔的锻件, 而普通模锻成形的锻件均为实心、带有飞边的结构, 锻件飞边需要通过切边工序才能去除。因此, 多向模锻成形锻件时的下料质量远低于普通模锻^[3-6]。

收稿日期: 2025-01-26; 修订日期: 2025-03-17

作者简介: 赵文成 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhaowc@tsinghua-tj.org

通信作者: 金青林 (1971-), 男, 博士, 教授

E-mail: jinqinglin@kust.edu.cn

(2) 节约机加工工时

普通模锻成形的锻件为实心结构;多向模锻工艺成形锻件的外形轮廓基本与产品接近,且带有孔腔,因此,通过多向模锻工艺成形的锻件的机加工工时远小于普通模锻^[7-10]。

(3) 锻件外轮廓流线连续

普通模锻的锻件成形过程产生飞边,最后通过切边工序将飞边切掉,锻件外轮廓流线被切断。多向模锻工艺成形的锻件无飞边,不会产生普通模锻中的飞边,锻件外轮廓流线连续^[11-13]。

水平两侧带法兰阀体锻件是紧急切断阀的关键零部件,在石油、天然气、化工、冶金、电力等领域具有广泛的用途,可以保障诸多应用领域中流体管线的安全运行。阀体锻件工作压力范围为 25~42 MPa,超、欠压紧急关闭响应时间小于 2 s。紧急关闭时,对阀体锻件震动大,阀体工作工况非常恶劣,因此,紧急切断阀锻件对力学性能、金相组织有严格的要求。采用多向模锻工艺成形阀体锻件时,锻件的力学性能和金相组织均优于技术要求,尤其是伸长率数值,远优于技术要求。采用多向模锻工艺生产阀体锻件的过程中,阀体锻件两侧法兰填充困难,造成锻件的合格率低。该产品每年需求近万件,因阀体锻件两侧法兰填充不满,使锻件生产成本低,迫切需要分析查找出阀体锻件两侧法兰填充困难的原因,并提出解决方案,提高产品合格率,降低生产成本。

1 水平两侧带法兰阀体锻件缺陷介绍

水平两侧带法兰阀体锻件的材质为 16Mn 钢,质量为 76 kg,产品形状如图 1 所示。阀体锻件采用多向模锻工艺成形,阀体锻件水平两侧法兰以及垂直孔腔均一次成形。阀体锻件生产过程中,两侧法兰填充不饱满,如图 2 所示,阀体锻件的合格率低,造成生产成本提高。

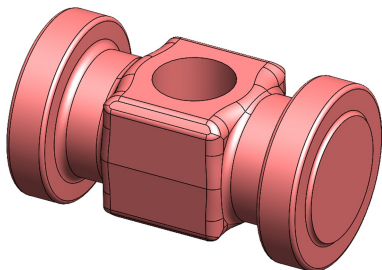


图 1 水平两侧带法兰阀体锻件产品形状

Fig. 1 Product shape of valve body forgings with flanges on both horizontal sides



图 2 阀体锻件两侧法兰填充不满

Fig. 2 Insufficient filling of flanges on both sides of valve body forgings

2 阀体锻件水平两侧法兰填充不满原因分析及解决措施

为了探讨阀体锻件水平两侧法兰填充不满的原因,通过有限元模拟软件对阀体锻件成形过程进行了仿真分析。锻件材质为 16Mn 钢,对阀体锻件成形过程进行仿真分析前,需要建立 16Mn 钢的材料模型。

2.1 锻件材质材料模型

16Mn 钢的材料模型在 Gleeble 热模拟试验机上通过压缩试验获得。16Mn 钢的锻造温度区间为 900~1200 °C,因此,试样压缩的温度分别为 900、950、1000、1050、1100、1150 和 1200 °C,试样压缩时应变速率分别为 0.05、0.1、0.5、1、4 和 6 s⁻¹,不同应变速率、温度的真应力-真应变曲线如图 3 所示。

2.2 阀体锻件水平两侧法兰填充不满原因分析

通过有限元模拟软件对阀体锻件成形过程进行仿真分析,锻件形状前后对称,有限元模拟时,采用 1/2 模型。模具材质设置为 H13 钢,锻件材质的材料模型根据 16Mn 钢在不同应变速率时不同温度下的真应力-真应变曲线获得。坯料始锻温度设定为 1200 °C,模具温度设定为 200 °C。模具运行时空程速度为 40 mm·s⁻¹,压制速度为 25 mm·s⁻¹。锻件生产过程中,采用非石墨型热精锻润滑剂,坯料与模具之间的摩擦因数为 0.15^[14],坯料与模具之间的热交换系数为 8 N·(s·mm·°C)⁻¹。水平带法兰阀体锻体成形过程如图 4 所示。

水平冲头挤压过程中,金属流动方向如图 5 所示。水平冲头开始对坯料进行挤压时,大部分金属的流动方向与冲头运动方向一致,向阀体锻件模具型腔中心区域流动。水平冲头挤压一段距离后,金属向模具型腔中心区域的流动阻力增大,坯料开始

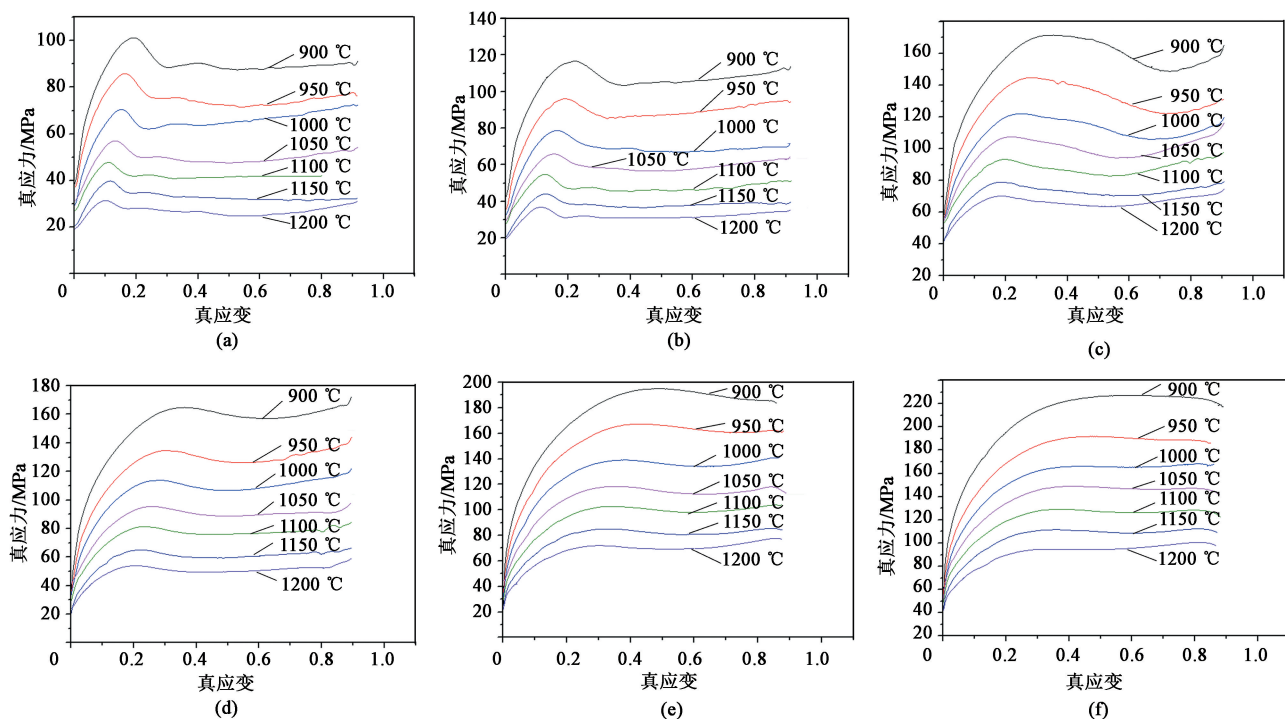


图3 不同应变速率时不同温度下的真应力-真应变曲线

(a) 0.05 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 0.5 s^{-1} (d) 1 s^{-1} (e) 4 s^{-1} (f) 6 s^{-1}

Fig. 3 True stress-true strain curves at different strain rates and temperatures

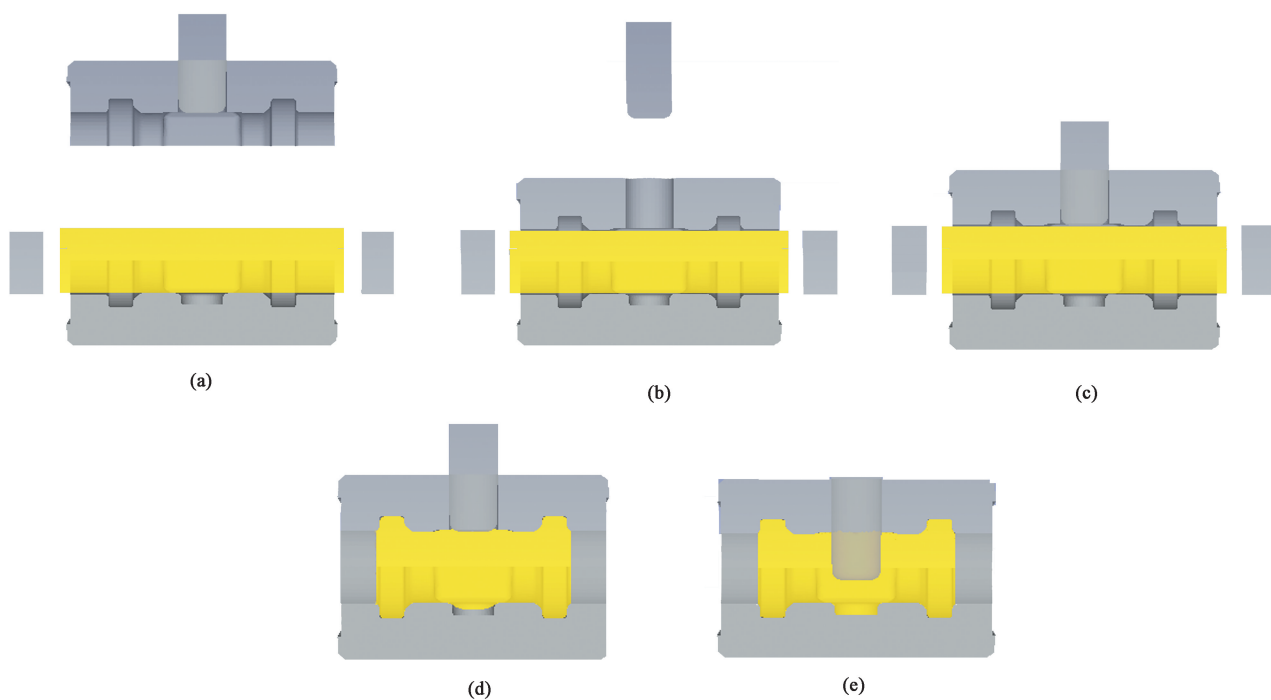


图4 锻件成形工艺过程模拟

(a) 初始状态 (b) 上模向下运行结束 (c) 上冲头向下预定位结束 (d) 水平冲头挤压结束 (e) 上冲头穿孔结束

Fig. 4 Simulation of forming process for forgings

(a) Initial state (b) End of downward movement of upper die (c) End of downward pre-positioning of upper punch
(d) End of extrusion by horizontal punch (e) End of piercing by upper punch

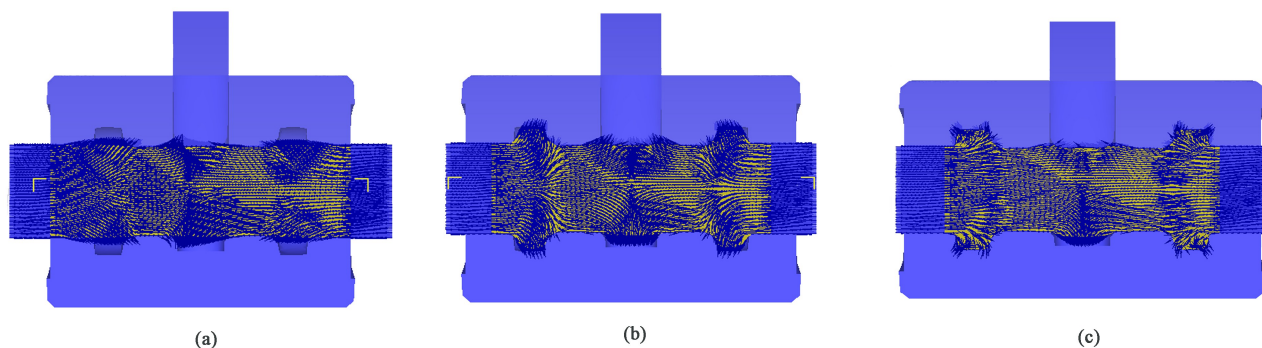


图 5 水平冲头挤压过程中金属流动方向变化

(a) 开始挤压 (b) 挤压过程中 (c) 挤压结束

Fig. 5 Changes in metal flow direction during extrusion process of horizontal punch

(a) Start of extrusion (b) During extrusion process (c) End of extrusion

向锻件两侧法兰型腔流动，成形锻件两侧法兰。水平冲头挤压后期，金属开始填充两侧法兰模具型腔，坯料两侧金属主要填充阀体锻件法兰型腔。水平冲头挤压金属成形法兰结束后，锻件温度分布如图 6 所示。水平冲头挤压结束后，与水平冲头接触以及锻件法兰内侧端面金属的温度已经降低至 800 ℃ 以下，锻件法兰外侧端面以及圆弧面金属温度已经降低至 900 ℃ 左右。该部分金属长时间与模具接触，温度降低，金属流动性差，造成锻件两侧法兰外侧填充不满，这也是阀体锻件两侧法兰模拟时能够填满而实际填充困难的主要原因。

由上述分析可知，水平冲头挤压过程中，金属首先向模具型腔中心流动，向模具中心流动的阻力增大后，金属开始向法兰模具型腔流动。流向法兰模具型腔的金属与模具的接触时间长，金属温度下降，造成水平冲头挤压后期金属流动困难，锻件两端法兰外侧填充不满。

2.3 阀体锻件水平两侧法兰填充不满解决措施

由上述分析可知，水平冲头挤压后期，金属温度降低，流动性差，造成锻件两侧法兰外侧填充不满。鉴于此，可以将阀体锻件水平两侧法兰的成形

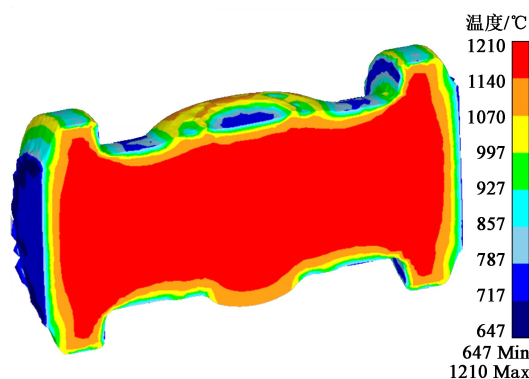


图 6 水平冲头挤压成形锻件法兰结束后锻件温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of forgings after extrusion of flanges by horizontal punch

方式进行优化，改为水平冲头镦粗成形法兰。

阀体锻件两侧法兰成形方式修改后，锻件成形过程中模具运动顺序不变。利用有限元模拟软件对水平冲头镦粗成形阀体锻件两侧法兰的过程进行仿真模拟，有限元模拟的前处理设置与 2.2 节中一致，此处不再描述。水平冲头镦粗成形锻件两侧法兰的模拟仿真过程如图 7 所示。

水平冲头镦粗成形阀体锻件两侧法兰过程中，

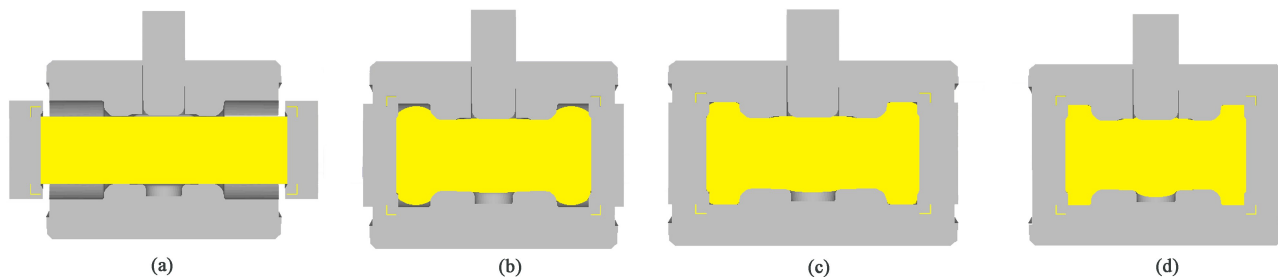


图 7 水平冲头镦粗成形锻件两侧法兰的过程

(a) 初始状态 (b) 镦粗坯料过程中 (c) 镦粗成形法兰 (d) 镦粗成形模具型腔中心

Fig. 7 Upsetting process of flanges on both sides of forgings by horizontal punch

(a) Initial state (b) During billet upsetting process (c) Flanges formed by upsetting (d) Center of die cavity for upsetting

前期金属不与模具接触，只在空气中进行热辐射，坯料温降不大。同时，水平冲头镦粗成形法兰时，金属流动性明显优于冲头挤压成形法兰工艺，金属流动性好，阀体锻件水平两侧法兰成形容易。阀体锻件两侧法兰成形结束时，金属完全充满阀体锻件两侧法兰的模具型腔，上冲头向下穿孔成形阀体锻件垂直孔腔。

由图7可知，水平冲头镦粗成形法兰过程中，前期坯料基本不与模具型腔接触，减缓了金属温度的下降。金属完全充满模具法兰型腔，阀体锻件两侧法兰成形结束。由上述模拟可知，锻件两侧法兰由水平挤压成形方式改为水平冲头镦粗成形方式后，金属流动阻力显著降低，两侧法兰成形效果良好。

3 水平两侧带法兰阀体锻件批量生产验证

水平两侧带法兰阀体锻件批量生产时，采用中频感应炉对坯料进行加热。坯料加热温度为1200℃，模具预热温度为200℃。锻件生产时，压机动作顺序为：上模向下运动直至合模结束→上冲头下行至模具型腔上端面进行预定位→水平冲头镦粗坯料→上冲头穿孔→上冲头回程→上模回程→水平冲头回程→顶杆顶出锻件，锻件脱模→机械手夹取锻件后顶杆回程。锻件生产过程如图8所示。

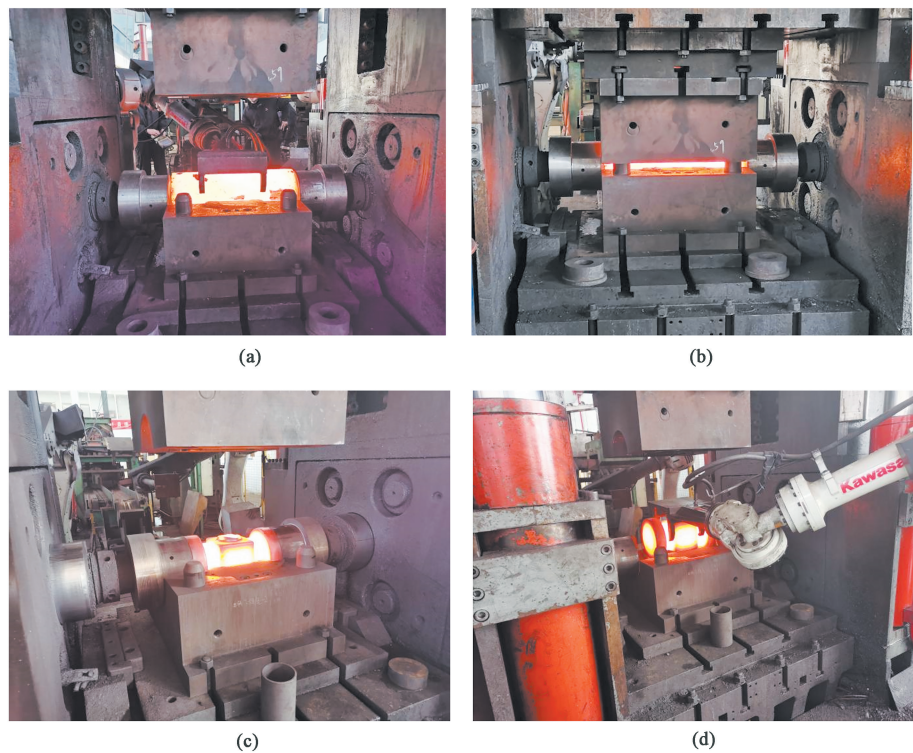


图8 锻件批量生产过程
(a) 坯料横向放置于模具型腔 (b) 上模合模 (c) 成形结束，锻件滞留在下模 (d) 机械手夹取锻件

Fig. 8 Batch production process of forgings

(a) Horizontal placement of billet into die cavity (b) Closing of upper die (c) Retention of forgings in lower die at end of forming process
(d) Picking up of forgings by manipulator

阀体锻件批量生产过程中，水平两侧法兰的填充情况如图9所示。由图9可知，批量生产中的每个阀体锻件两侧法兰均填充饱满，满足阀体锻件的技术要求。

4 结论

(1) 水平冲头挤压成形阀体锻件两侧法兰时，

金属首先向模具型腔中心流动，向模具中心流动的阻力增大后，金属开始向法兰两侧流动，开始成形法兰。坯料两端的金属与模具接触时间长，金属温度下降，造成水平冲头挤压后期金属向法兰外侧流动困难，锻件两端法兰外侧填充不满。

(2) 阀体锻件两侧法兰成形方式由水平冲头挤压成形改为镦粗成形。镦粗成形锻件两侧法兰前期



图 9 批量生产时阀体锻件两侧法兰成形情况

Fig. 9 Forming of flanges on both sides of valve body forgings during batch production

过程中,金属不与模具接触,仅在空气中进行热辐射,坯料温降不大。同时,法兰成形方式改为墩粗成形后,金属流动阻力降低,金属流动性提高,阀体锻件水平两侧法兰成形较为容易。

(3) 阀体锻件批量生产结果验证了水平冲头墩粗成形阀体锻件两侧法兰工艺方案的可行性,生产过程稳定、可靠,锻件合格率高。

参考文献:

- [1] 白雪晨. 深孔三通阀体多向挤压工艺有限元仿真与试验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
Bai X C. Finite Element Simulation and Experimental Study on Multi-directional Extrusion Process of Deep-hole Three-way Valve Body [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [2] 任运来, 殷达义, 任杰, 等. 带主法兰三通阀体的多向模锻成形方案 [J]. 上海电机学院学报, 2016, 19 (2): 63-69.
Ren Y L, Yin D Y, Ren J, et al. Forming schemes of multiple-ram forming of three-port valve body with primary flange [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2016, 19 (2): 63-69.
- [3] 张家伟, 王楠楠, 任杰, 等. 采油树用平板阀多向模锻成形工艺研究 [J]. 锻造与冲压, 2023 (23): 20-23.
Zhang J W, Wang N N, Ren J, et al. Research on multi directional forging process of flat valve for oil tree [J]. Forging & Metalforming, 2023 (23): 20-23
- [4] 宋昌哲, 胡艳军. 典型阀门阀体多向模锻成形工艺及应用 [J]. 锻造与冲压, 2022 (7): 61-64.
Song C Z, Hu Y J. Muti-directional die forging technology and application of typical valve body [J]. Forging & Metalforming, 2022 (7): 61-74.
- [5] 熊文涵. 三通阀体多向模锻工艺有限元仿真及工艺参数优化 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
Xiong W H. Finite Element Simulation and Process Parameter Optimization of Multi-direction Die Forging for Three-way Valve Body [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [6] 张家伟, 刘金洪, 王楠楠, 等. 阀体多向模锻成形缺陷分析及工艺优化仿真 [J]. 锻造与冲压, 2023 (21): 54-56.
Zhang J W, Liu J H, Wang N N, et al. Analysis of defects and process optimization simulation in multi directional forging forming of valve body [J]. Forging & Metalforming, 2023 (21): 54-56.
- [7] 安轲, 黄亦其. 模具加载方式对不规则阀体多向模锻工艺的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 16-23.
An K, Huang Y Q. Influence of die loading mode on multi-directional die forging process for irregular valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 16-23.
- [8] 葛苏, 任杰, 张家伟. 带凸台无底缸体零件的多向模锻工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (1): 143-148.
Ge S, Ren J, Zhang J W. Research on multi-ram die forging process of bottomless cylinder parts with lug boss [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (1): 143-148.
- [9] 张家伟, 王金业, 吴艳丽, 等. 球阀阀体的两种多向模锻成形工艺探究 [J]. 锻造与冲压, 2023 (7): 41-43.
Zhang J W, Wang J Y, Wu Y L, et al. Exploration of two multi directional forging processes for ball valve body [J]. Forging & Metalforming, 2023 (7): 41-43.
- [10] 吴伟奇. 油液截断阀阀体多向模锻工艺数值模拟及优化 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
Wu W Q. Numerical Simulation and Optimization of Multi-directional Die Forging Process for Oil Block Valve Body [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.
- [11] 张家伟, 刘金洪, 孙海军, 等. 消除多向模锻闸阀阀体垂直孔纵向飞边的工艺研究 [J]. 锻造与冲压, 2022 (19): 47-49.
Zhang J W, Liu J H, Sun H J, et al. Research on the process of eliminating longitudinal burrs in the vertical hole of multi-directional forging gate valve body [J]. Forging & Metalforming, 2022 (19): 47-49.
- [12] 高贵, 殷璟, 孙仲辉, 等. 空调冷冻阀阀体锻造成形工艺分析及优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (2): 24-30.
Gao G, Yin J, Sun Z H, et al. Analysis and optimization on forging process for air conditioning freezing valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (2): 24-30.
- [13] 王志录, 施文鹏, 车安达. TA33 钛合金舵机支架锻造成形工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 57-63.
Wang Z L, Shi W P, Che A D. Forging technology of steering engine bracket for TA33 titanium alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 57-63.
- [14] 中国机械工程学会塑性工程分会. 锻压手册 第 1 卷 锻造 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging Manual Volume 1 Forging [M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2008.