

## 热拉深工艺在薄壁法兰中的应用

王金鹏, 党 恩, 杨永强, 关 朕, 陈孝庆, 康海鹏, 王平怀, 李 超

(宝鸡石油机械有限责任公司热工分公司, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:** 为了解决使用普通胎膜锻工艺生产的薄壁法兰锻件伴有的内孔加工余量大、材料浪费严重等问题。从理论上分析了热拉深工艺的成形特点, 总结了其金属填充规律, 预测了主要成形缺陷, 并根据理论分析结果设计出薄壁法兰的制坯和成形模具及热拉深成形工艺。采用有限元模拟软件对成形过程进行仿真, 分析了变形过程中速度场和载荷的变化规律。经过生产试制, 发现使用热拉深工艺生产出的法兰产品的外观、尺寸均符合工艺要求。相比与普通胎膜锻工艺, 热拉深工艺生产的产品在宏观方面, 单件下料重量减少约 430 kg, 并节约机加工工时约 20%; 在微观方面, 其内部组织更加细密、均匀, 且通过超声波探伤, 内部质量良好, 符合设计要求。为薄壁法兰的生产提供了一种新方法。

**关键词:** 薄壁法兰; 热拉深工艺; 胎膜锻; 模具设计; 分流面

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.008

**中图分类号:** TG316.3; TG356.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0045-07

## Application of hot drawing process in thin-walled flange

Wang Jinpeng, Dang En, Yang Yongqiang, Guan Zhen, Chen Xiaoqing, Kang Haipeng, Wang Pinghuai, Li Chao

(Hot Working Branch, Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd., Baoji 721000, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of large machining allowance of inner hole and serious material waste for thin-walled flange forgings produced by ordinary loose tooling forging process, the forming characteristics of hot drawing process were analyzed theoretically, the metal filling law was summarized, and the main forming defects were predicted. Then, according to the theoretical analysis results, the blanking and forming moulds of thin-walled flange as well as hot drawing process were designed. Furthermore, the forming process was simulated by finite element simulation software, and the variation laws of velocity field and load in the deformation process were analyzed. After trial production, it is found that the appearance and sizes of flange products produced by the hot drawing process meet the process requirements. Compared with the ordinary loose tooling forging process, in the macroscopic aspect the blanking weight of the products produced by the hot drawing process is reduced by about 430 kg and the machining time is saved by about 20%. However, in the microscopic aspect, its internal structure is more fine and uniform, and through ultrasonic flaw detection, the internal quality is good and meets the design requirements. Thus, it provides a new method for the production of thin-walled flange.

**Key words:** thin-walled flange; hot drawing process; loose tooling forging; mould design; shunt surface

薄壁法兰在石油管道中的应用非常广泛, 但由于其内孔与外径尺寸的比值较大, 单边壁厚较薄, 使用传统的胎膜锻方法已无法锻出满足要求的内孔尺寸。遇到此类锻件排产时, 生产单位迫于生产周期的压力, 常常在内孔添加余块按普通胎膜锻工艺执行。这样的工艺生产出的产品存在材料浪费严重、内孔加工余量巨大等缺点。为了生产出加工余量小的薄壁法兰锻件, 学者们进行了大量的研究工作。

赵玉民等<sup>[1]</sup>研究了外台阶法兰的辗轧成形规律, 并通过设计制坯参数在辗环机上实现了大孔径法兰的成形。按照此思路, 如果按零件参数设计主辊并依靠辗环机辗扩成形, 则需要配套型号的辗环机及相应的工装, 需要大量的资金投入, 因此, 此思路仅适合大批量件生产。文献 [2] 和文献 [3] 介绍了使用管坯进行锻锻成形薄壁法兰, 即将坯料制成与法兰小台外径尺寸相当的筒形件放置在模具内, 局部锻粗成形法兰大台, 如果筒形件较高, 还可设计模具进行累积锻挤成形<sup>[4]</sup>。文献 [5] 介绍了使用流体力学成形法实现变截面薄壁管件的成形。这些方法解决了法兰小台形状规则的零件的成形难题, 但对于法兰小台尺寸稍复杂的零件, 则增加了简料

**收稿日期:** 2021-04-02; **修订日期:** 2021-07-05

**基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目 (2021ZG08)

**作者简介:** 王金鹏 (1986-), 男, 学士, 工程师

**E-mail:** 1091295398@qq.com

的制坯难度。文献 [6] 提出了一种实心制坯后扩孔与芯轴拔长复合生产的分段扩孔工艺, 以少量的工装投入, 实现了大型法兰锻件的生产。这种方法适合大型法兰的自由锻生产, 对于中、小型法兰, 生产过程繁琐, 且不适用于法兰小台外形复杂的产品。核电水室封头由于其尺寸大、重量大、形状复杂、成形难度高, 国内已进行了大量的研究与实践, 其中, 较为先进的成形方法——热拉深成形工艺 [7] 得到了大量的应用。张国智 [8] 研究了大型封头热拉深的力学机理。周朝辉等 [9] 研究了厚壁椭圆形封头的热拉深成形规律。江学强等 [10] 使用热拉深成形工艺成功锻出了厚壁筒形件。热拉深成形工艺与冲压中的拉深工艺类似, 为一种使用拉深冲头 (凸模) 和凹模将加热后的坯料拉深成符合形状和尺寸要求的产品的新工艺, 这种工艺在薄壁法兰中的应用鲜有报道。本文将依托热拉深成形工艺, 从理论分析到生产实践探讨热拉深成形工艺在薄壁法兰 (图 1) 中的应用。

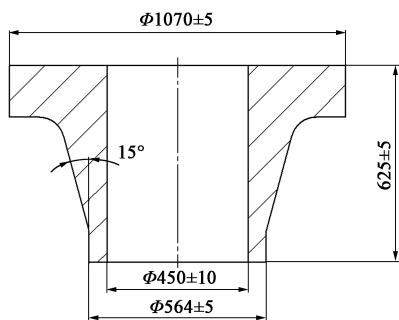


图 1 薄壁法兰锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of thin-walled flange

## 1 成形性分析

假设把坯料锻为圆饼状后放置在凹模上, 使用凸模从坯料上端压入, 如图 2a 所示, 其中,  $D$  为坯料直径,  $H$  为坯料高度,  $d_0$  为冲头直径, 标记坯料上端面与圆周交线上任一点为  $A$ , 坯料下端面与圆周交线上任一点为  $B$ 。当  $\frac{D}{d_0} < 5$  时 [11], 随着凸模的下压, 凸模底部的坯料被迫变形, 上端面的材料在凸模底部变形部分材料的拉力影响下发生凹陷,  $A$  点向圆心方向移动, 并略有下降 [12], 成为  $A'$  点, 坯料直径略有减小为  $D'$ , 高度略有降低为  $H'$ , 坯料下端面由于受模具表面的摩擦力作用, 没有相对运动,  $B$  点与  $B'$  点基本重合 (图 2b)。随着凸模的下移,

坯料的变形过程如图 2 所示, 其中,  $V_1$  为变形开始时凸模下部的坯料体积,  $V_2$  为坯料拉缩后相对于原法兰大台的坯料减少的体积,  $V_3$  为材料充满模膛所需要的材料体积及冲孔连皮的体积。

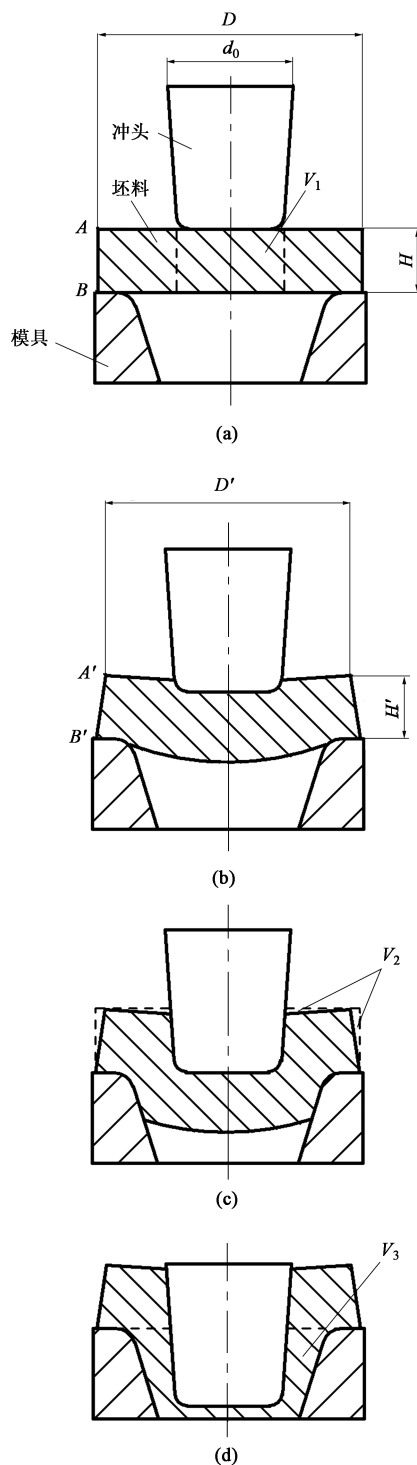


图 2 坯料热拉深成形过程

(a) 准备热拉深 (b) 热拉深初期  
(c) 凸模与凹模平齐 (d) 热拉深结束

Fig. 2 Hot drawing process of blank

(a) Prepare for hot drawing (b) Early stage of hot drawing  
(c) Flushing of punch and die (d) End of hot drawing

根据坯料变形前后的形状变化, 并结合体积不变定律, 可以得出: 充填模具型腔的材料体积等于热拉深初期冲头底部坯料的体积与热拉深过程中坯料凹陷所减少体积的代数和, 如式 (1) 所示:

$$V_3 = V_1 + V_2 \quad (1)$$

在工艺设计中, 若忽略法兰大台因热拉深减少的体积, 则式 (1) 可简化为式 (2):

$$V_3 = V_1 \quad (2)$$

式 (2) 表示的含义为: 冲头底部的材料用以填充模膛。为了确保模膛充填完整, 应尽可能使  $V_1$  略大于  $V_3$ 。

依据最小阻力定律, 如果把坯料变为空心坯料, 同样使用凸模热拉深时, 凸模底部的坯料将有充填内孔的趋势, 其他变形规律与实心坯料相同。所以, 当产品尺寸确定后, 如何设计热拉深前的坯料形状成为工艺成功与否的关键。

## 2 成形方案及模具设计

由于在自由锻压机上使用凸模对坯料进行冲挤

拉深时没有导向, 仅靠人工目测容易使冲头放偏导致内孔加工量偏小<sup>[13]</sup>; 同时, 对于需要拉深深度的产品, 要保证  $V_1 > V_3$ , 坯料的厚度必定较厚, 由于坯料总重一定, 这必定引起坯料外径偏小, 在热拉深中造成坯料拉缩严重。

为了避免上述缺陷, 从 3 个方面入手设计预制坯和成形模具。

(1) 按锻件图外形尺寸设计成形凹模, 如图 3c 所示。

(2) 将预制坯设计为空心法兰形状, 法兰大台外径略小于锻件尺寸, 法兰小台外径尺寸与锻件相同, 法兰高度依据体积不变定律确定, 如图 3b 所示。

(3) 将凸模设计为台阶状, 凸模小端外径 ( $\Phi 230$  mm) 与预制坯内孔尺寸相同, 凸模大端外径 ( $\Phi 450$  mm) 为法兰内孔尺寸, 如图 3a 所示。这样设计有两个方面的好处: ①预制坯的法兰保证冲头底部坯料体积的同时有利于坯料的最终成形。②凸模与预制坯之间通过内孔对中, 预制坯与凹模之间通过预制坯法兰的小台对中, 从而避

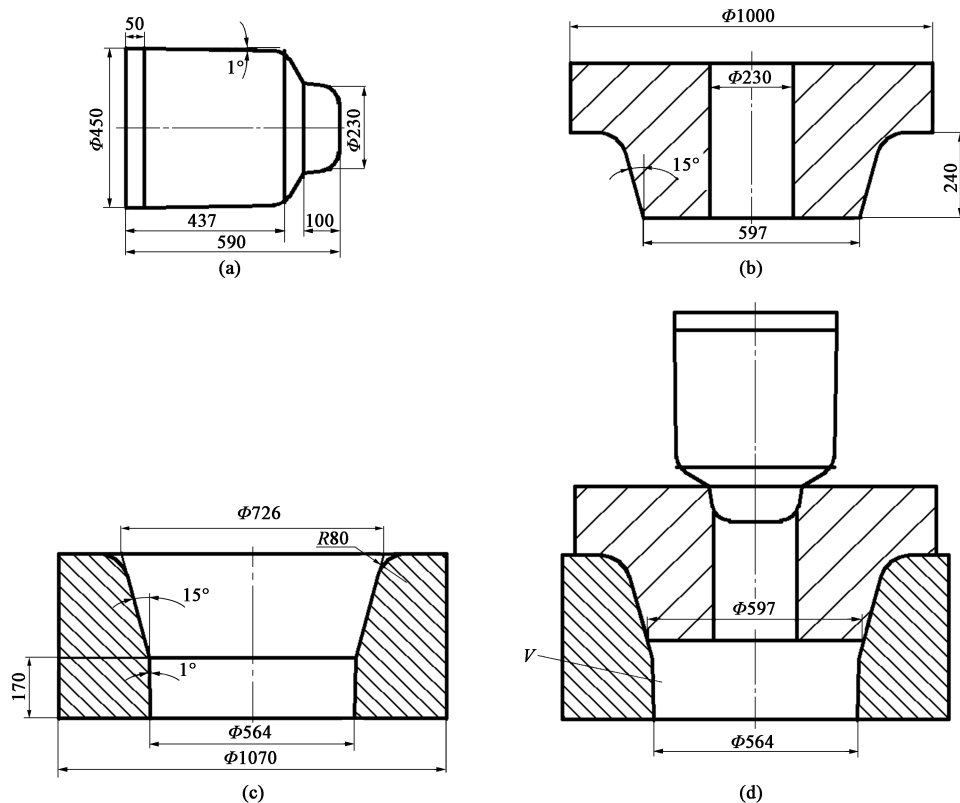


图3 预制坯和成形模具图

(a) 凸模 (b) 预制坯 (c) 凹模 (d) 凸模、凹模与预制坯的对中

Fig. 3 Diagrams of preform and forming die

(a) Punch (b) Preform (c) Die (d) Alignment of punch, die and preform

免了人工目测的误差,如图 3d 所示,其中  $V$  为坯料放进成形模具后下端的空腔体积。而且,在热拉深过程中还可依靠内孔导向防止凸模走偏。

模具设计完成后,需要对热拉深填充部分的材料体积进行计算验证。坯料放进成形模具后,下端的空腔体积  $V$  由两个部分组成:成形法兰坯料所需要的体积  $V_{\text{拉深}}$  及冲孔芯料的体积  $V_{\text{芯料}}$ ,则通过图 3 可以得到:

$$V = V_{\text{拉深}} + V_{\text{芯料}} = (D_{\text{平均}}^2 - 450^2) \times H_{\text{拉深}} \times \frac{\pi}{4} + 450^2 \times 150 \times \frac{\pi}{4} = 4.58 \times 10^7 \text{ mm}^3 \quad (3)$$

凸模底部坯料的体积  $V_{\text{填充}}$  为:

$$V_{\text{填充}} = (450^2 - 230^2) \times \frac{\pi}{4} \times 435 = 5.1 \times 10^7 \text{ mm}^3 \quad (4)$$

式中:  $D_{\text{平均}}$  为热拉深填充部分的平均直径;  $H_{\text{拉深}}$  为热拉深填充部分的高度。

可以看出  $V_{\text{填充}} > V$ ,说明坯料体积足以充填模具

型腔,符合理论要求。

根据预制坯尺寸设计出预制坯成形模具,如图 4 所示。并确定成形方案为:下料—加热—使用模具对坯料制坯—使用凸模和凹模进行热拉深成形—切除冲孔芯料—平整大台—出模。

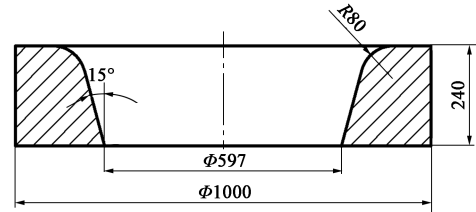


图 4 制坯模具

Fig. 4 Blanking mould

### 3 有限元分析

为了验证理论分析的结果,使用有限元模拟软件对热拉深成形过程进行仿真模拟。设置始锻温度

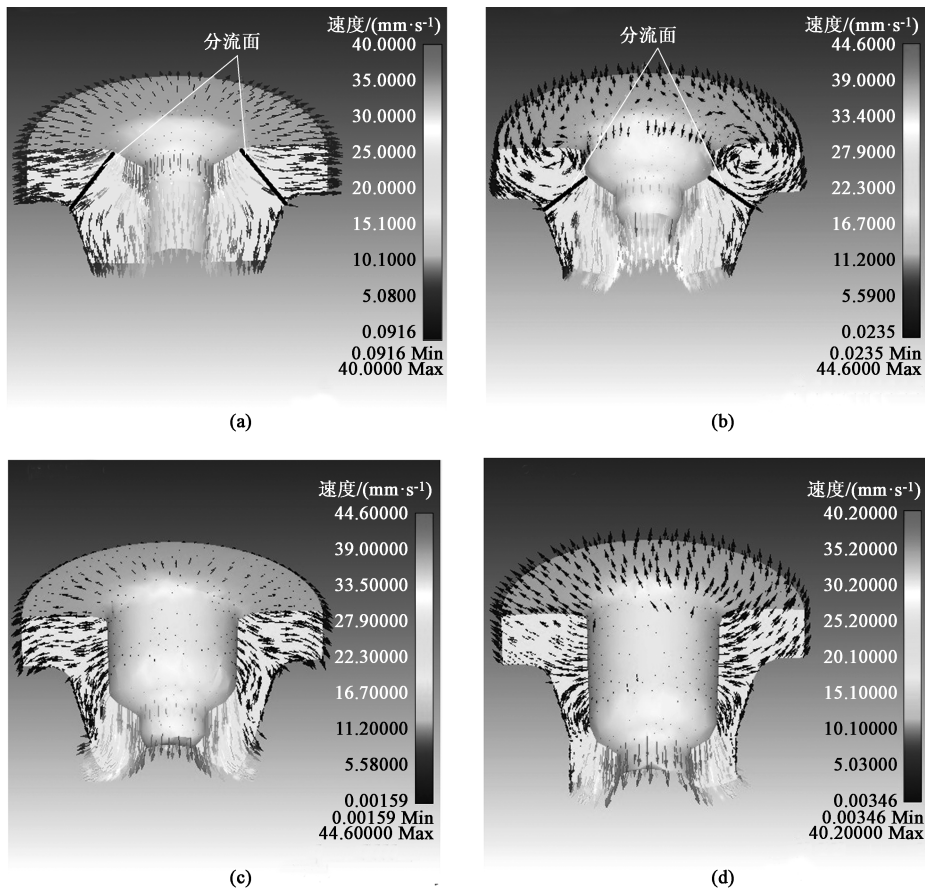


图 5 热拉深过程典型瞬间的速度场分布

(a) 热拉深初期 (b) 凸模与凹模接近平齐 (c) 凸模压入凹模 (d) 热拉深后期

Fig. 5 Velocity field distributions at typical moment in hot drawing process

(a) Early stage of hot drawing (b) Flushing of punch and die (c) Punch pressed into die (d) Late stage of hot drawing

为  $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 凸模下压速度为  $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图5为热拉深过程典型瞬间的速度场分布图。从图5可以看出: 拉深初期, 在凸模压力的作用下, 凸模以下的材料向下发散流动, 法兰盘上的质点有向直径方向移动的趋势, 上端面的材料在冲头的牵拉作用下形成一定的凹陷, 分流面位于凸模与凹模的角部连线上(图5a)。随着凸模下移, 凸、凹模之间的间隙越来越小, 凸模下部的材料在向下流动的同时推动法兰盘底部的材料克服凹模平面的摩擦力向直径方向翻挤, 逐渐加剧法兰上端面的凹陷, 分流面依然位于凸、凹模角部的连线上(图5b)。当凸、凹模平面平齐后, 基本完成材料的分配。此时, 法兰盘质点移动较少, 变形主要集中在模具型腔内部(图5c)。凸模压至底部后, 材料充满型腔, 连皮为环状(图5d)。从整个热拉深过程可以看出, 凸模下面的材料处于大变形区, 此部分材料大多流向凹模型腔, 有少量被挤压进法兰大台。所以, 为了保证热拉深后材料在凹模内充填完整, 在工艺设计时应保证冲头底部的材料体积略大于欲充填的型腔体积。

图6为热拉深过程中的载荷变化曲线。从图6可以看出: 在热拉深初期, 载荷平稳上升; 当凸模与凹模接近平齐时, 载荷达到第1个峰值; 随着凸模下行, 凸模底部的坯料被拉深、翻挤后充填模腔, 受模腔内壁锥度的影响, 凸模与凹模之间的间隙越来越小, 材料受到强烈的挤压作用, 载荷达到第2个峰值; 当坯料充填至模腔内两个锥度交界处时, 凸模受到的阻力更大, 载荷达到第3个峰值, 最大载荷为  $1.597\times 10^4\text{ kN}$ 。

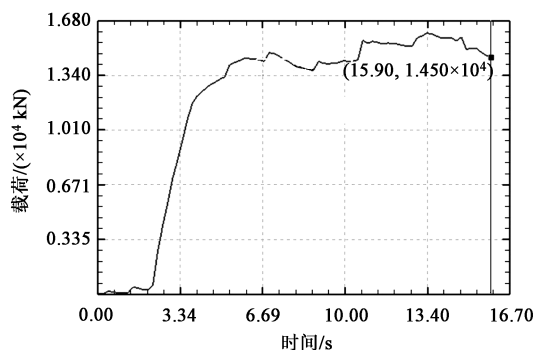


图6 热拉伸过程中载荷变化曲线

Fig. 6 Changing curve of load in hot drawing process

## 4 生产试制

根据前期理论分析, 结合有限元模拟结果, 对法兰锻件进行试制。为了充分细化晶粒、获得良好的综

合力学性能, 选用自炼钢锭作为原材料, 并在炼钢时添加了稀土元素 Ce<sup>[14]</sup>。生产过程及实物如图7所示。在实际生产过程中, 法兰大台在形状上有明显的变化: 随着凸模下行, 法兰大台上端面直径有一定减小(图7a); 热拉深中期, 一部分材料从法兰大台底部向外流动, 迫使法兰大台翘曲; 法兰大台受到周围材料的牵拉、挤压后, 法兰上端面有约50 mm的凹陷。热拉深结束切除芯料后, 冲孔芯料为实心圆饼, 并非圆环, 与前期理论分析结果一致。经后期平整, 法兰大台的拉缩及凹陷缺陷基本消除(图7c)。

本次共试制两件产品, 该产品实际下料质量为1800 kg, 与原普通胎模锻工艺相比, 单件减少下料质量430 kg。生产结束后, 经检验测量, 产品各尺寸均符合要求, 内孔无偏孔现象, 拉深部位无折叠、裂纹等缺陷(图7b和图7d), 符合工艺要求。并且, 由于加工余量大幅度降低, 该产品的机加工工时相比于原工艺减少约20%。加工完成后, 经超声波探伤发现, 产品内部质量良好, 符合设计要求。

该产品传统的生产工艺为普通胎模锻, 对两种工艺下的法兰锻件粗车后进行同炉调质处理。调质工艺为  $860\text{ }^{\circ}\text{C}$  加热保温后水冷淬火,  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  回火, 然后在筒体横截面处分别取样(取样位置如图8a和图8b所示)进行金相试验, 对比分析其金相组织。两种工艺生产的产品的金相检验结果如图8c和图8d所示。从图8中可以看出, 两种锻造工艺下调质组织均为回火索氏体+贝氏体。按照标准 GB/T 6394—2002<sup>[15]</sup>的截点法对晶粒度进行评级, 传统工艺下晶粒度为7.5级, 改进工艺后晶粒度为9.0级, 改进工艺后组织更为细密、均匀。

## 5 结语

使用热拉深工艺生产的法兰单件减重430 kg, 与普通胎膜锻工艺相比, 节约机加工工时约20%。加工完成后, 经超声波探伤, 内部质量良好, 符合设计要求。说明使用热拉深工艺成形薄壁法兰锻件可行。制定本工艺生产薄壁法兰锻件时, 应考虑以下几点:

(1) 凸模底部的坯料体积应略大于填充模腔的材料体积, 以补偿一部分向法兰大台流动的材料损失;

(2) 使用热拉深工艺成形薄壁法兰时, 凸模由于在生产实践中无法准确对中, 应考虑凸模的导向问题。否则, 可能因为凸模走偏导致工艺失败。坯料预冲孔对凸模热拉深过程有一定的导向作用, 可

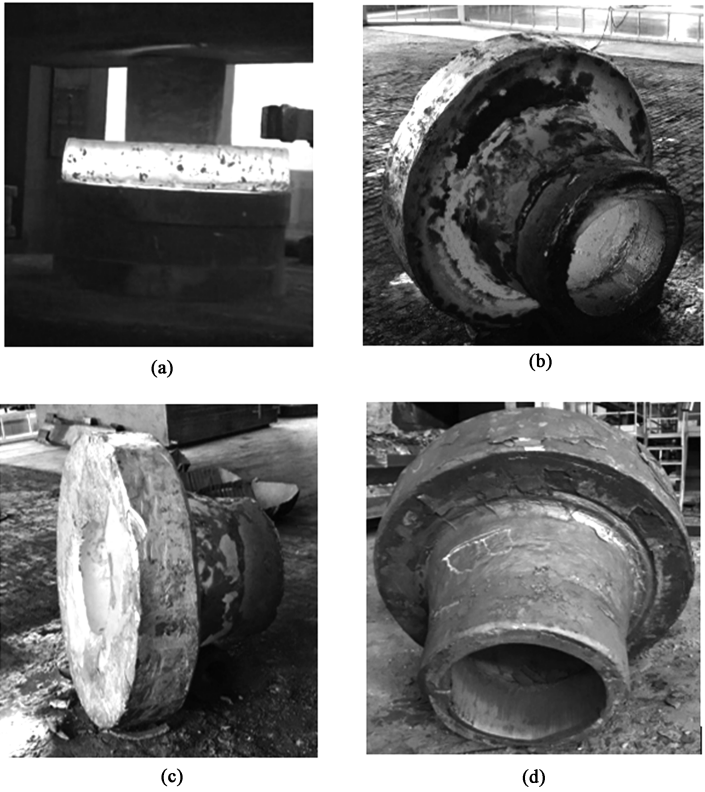


图 7 生产过程及产品实物  
(a) 热拉深初期 (b) 生产结束 (c) 端面凹陷 (d) 成品

Fig. 7 Production process and products  
(a) Early stage of hot drawing (b) End of production (c) Sunken end face (d) Finished product

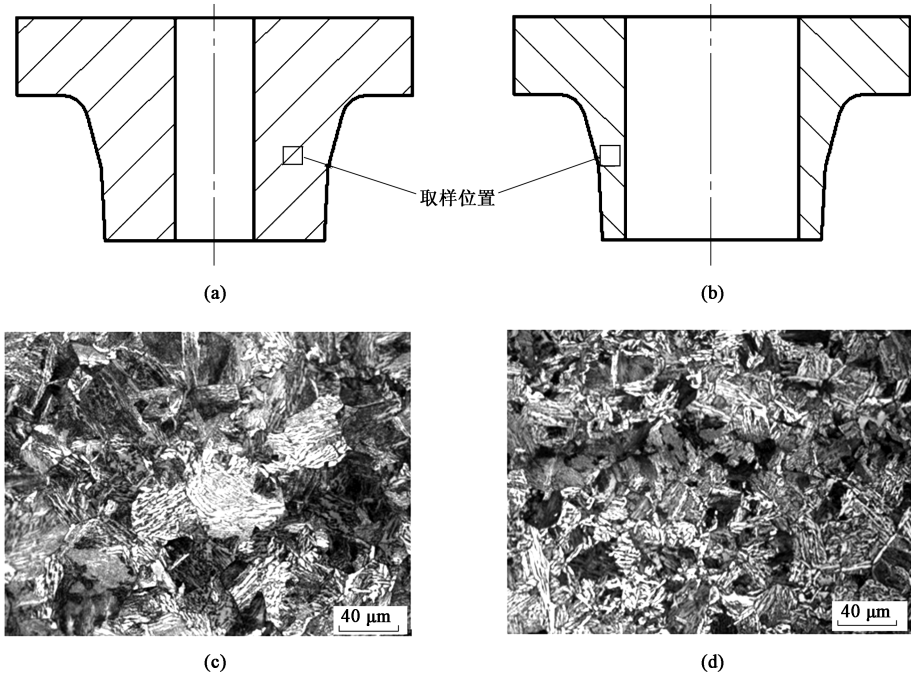


图 8 取样位置及微观组织  
(a) 普通胎模锻工艺的取样位置 (b) 热拉深工艺的取样位置 (c) 普通胎模锻工艺的微观组织 (d) 热拉深工艺的微观组织

Fig. 8 Sampling locations and microstructures  
(a) Sampling location of ordinary loose tooling forging process (b) Sampling location of hot drawing process  
(c) Microstructure of ordinary loose tooling forging process (d) Microstructure of hot drawing process

以推广使用;

(3) 热拉深成形后, 法兰大台有一定的凹陷, 凹陷程度随着法兰大台外径尺寸与热拉深冲头外径尺寸的比值增大而减弱, 故当法兰大台外径尺寸不大时, 应着重考虑法兰大台凹陷的影响, 适当增加制坯时法兰大台的厚度, 可在最后平整大台时减少凹陷。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉民, 华林, 胡亚民. 带外台阶法兰环件轧制的变形规律研究 [J]. 模具技术, 2006, (2): 30-32.  
Zhao Y M, Hua L, Hu Y M. Study on deformation rule of rolling of flange with outer step [J]. Die and Mould Technology, 2006, (2): 30-32.
- [2] 高东升. 高径薄壁法兰锻件的锻锻成形工艺与模具 [J]. 机械工程与自动化, 2017, (3): 123-124.  
Gao D S. Upsetting forging process and die for a flange forging with high neck and thin wall [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017, (3): 123-124.
- [3] 丁泰然, 胡成亮, 赵震, 等. 管坯锻挤成形工艺成形极限的上限法分析 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 28-33.  
Ding T R, Hu C L, Zhao Z, et al. Upper-bound analysis of forming limit of tube upsetting process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 28-33.
- [4] 王鑫, 王强, 张治民, 等. 薄壁筒形件累积锻挤成形法兰研究 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48 (6): 42-46.  
Wang X, Wang Q, Zhang Z M, et al. Research on cumulative upset extrusion flange of thin-walled tube [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48 (6): 42-46.
- [5] 袁秦峰, 梁必成, 孙镭, 等. 钛合金变截面薄壁管流体力学成形工艺 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 80-85.  
Yuan Q F, Liang B C, Sun L, et al. Hydromechanical forming process of titanium alloy thin-walled tubes with variable cross-section [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 80-85.
- [6] 李昌义, 胡振志, 李春辉, 等. 特大型水电台阶法兰锻件工艺技术 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 37-42.  
Li C Y, Hu Z Z, Li C H, et al. Process technology on extra-large hydropower stepped flange forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 37-42.
- [7] 胡朝备. 水室封头热拉深成形规律及工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- Hu C B. Research on Hot Drawing Laws and Process of Water Chamber Head [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [8] 张国智. 大型封头热拉深力学机理及仿真研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (8): 1114-1117.  
Zhang G Z. Study on mechanics mechanism and simulation of hot-drawing process of large head [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (8): 1114-1117.
- [9] 周朝辉, 曹海桥, 吉卫. 厚壁椭圆形封头热拉深成形及有限元模拟 [J]. 热加工工艺, 2004, 33 (9): 44-45.  
Zhou C H, Cao H Q, Ji W. Hot drawing and finite element simulation of thick-wall ellipse end sochet [J]. Hot Working Technology, 2004, 33 (9): 44-45.
- [10] 江学强, 吉卫, 曹海桥, 等. 厚壁筒形件热拉深成形数值模拟及工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (11): 148-154.  
Jiang X Q, Ji W, Cao H Q, et al. Numerical simulation and technical study of hot drawing forming thick-wall cylinder [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (11): 148-154.
- [11] 吕炎. 锻压成形理论与工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.  
Lyu Y. Forging Forming Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [12] 张英杰, 靳文德, 马爱琴. 法兰锻坯成型高度的确定 [J]. 太原重型机械学院学报, 1999, 20 (2): 131-133.  
Zhang Y J, Jin W D, Ma A Q. Determination about forming height of flange forging blank [J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 1999, 20 (2): 131-133.
- [13] 吕炎. 锻模设计手册 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Lyu Y. Design Manual of Forging Die [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [14] 郑丽丽, 彭军, 安胜利, 等. 稀土 Ce 对贝氏体钢热处理组织和性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (11): 1191-1200.  
Zheng L L, Peng J, An S L, et al. Heat treatment microstructure and properties of bainitic steel with addition of rare earth cerium [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (11): 1191-1200.
- [15] GB/T 6394—2002, 金属平均晶粒度测定方法 [S].  
GB/T 6394—2002, Metal-methods for estimating the average grain size [S].

新资讯  
新营销  
新媒体



《QC检测》神页



《机加工》神页



QC检测仪器—公众号



天下机械—公众号

天下机械网 [www.qctms.cn](http://www.qctms.cn)  
QC检测仪器网 [www.qctest.com](http://www.qctest.com)

【神页: 扫码直接阅读、  
收藏、下期自动更新。】