

## T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺

刘光辉<sup>1</sup>, 孙红星<sup>1,2</sup>, 王 振<sup>3</sup>, 张亚龙<sup>1,3</sup>, 云淑娟<sup>1</sup>, 刘 丹<sup>1</sup>, 张 超<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. 郑州航空工业管理学院 航空宇航学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** T 形不锈钢阀体通常采用板材或棒材切削加工的方式生产, 其材料利用率及生产效率低下。针对该问题, 提出了一种新的 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺, 并利用有限元模拟软件 Deform-3D, 对 T 形不锈钢阀体的多轴联动成形工艺进行了数值模拟, 分析了零件的工艺难点及成形过程中的载荷-时间曲线、等效应力场分布和温度场分布等, 最后设计了相应模具并进行了试验验证。研究表明: 该 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺具有可行性, 模拟得到的锻件充填饱满, 金属流线基本沿锻件轮廓方向, 成形过程中的最大载荷为 6620 kN, 工艺试验得到的锻件的尺寸一致性较好, 说明工艺可靠性高, 对该类零件的多轴联动成形工艺具有一定的指导意义。

**关键词:** T 形不锈钢阀体; 多轴联动成形; 载荷; 等效应力场; 温度场

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.002

**中图分类号:** TG314.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0007-07

## Multi-axis linkage forming process on T-shaped stainless steel valve body

Liu Guanghui<sup>1</sup>, Sun Hongxing<sup>1,2</sup>, Wang Zhen<sup>3</sup>, Zhang Yalong<sup>1,3</sup>, Yun Shujuan<sup>1</sup>, Liu Dan<sup>1</sup>,  
Zhang Chao<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. School of Aerospace Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** T-shaped stainless steel valve body is usually produced by cutting plate or bar, which has low material utilization and production efficiency. Therefore, a new multi-axis linkage forming process of T-shaped stainless steel valve body was proposed, and the multi-axis linkage forming process of T-shaped stainless steel valve body was numerically simulated by finite element simulation software Deform-3D. Then, the process difficulties of parts and the load-time curve, equivalent stress field distribution and temperature field distribution in the forming process were analyzed. Finally, the corresponding die was designed and verified by experiment. The research results show that the proposed multi-axis linkage forming process of T-shaped stainless steel valve body is feasible. The simulated forgings are fully filled, and the metal streamline is basically along the contour of forgings, the maximum load in forming process is 6620 kN. The dimensional consistency of forgings obtained from the process test is good, which shows that the process reliability is high and has certain guiding significance for the multi-axis linkage forming process of this kind of parts.

**Key words:** T-shaped stainless steel valve body; multi-axis linkage forming; load; equivalent stress field; temperature field

T 形不锈钢阀体被广泛应用于差压/压力变送器、压力仪表等的配套安装, 可用于开启、切断、排放流体的流量、压力、压差和液位等操作, 同时方便仪表的在线安装、调试、维护和检查, 其通常

在高温、高压的环境中工作<sup>[1-3]</sup>。目前, 该类型阀体通常采用板材或棒材切削加工的方式生产, 其材料利用率及生产效率低, 而且在切削加工过程中会导致金属流线切断, 严重影响其性能。因此, 需要研究一种新的成形工艺以提高材料利用率、生产效率及零件强度。该阀体材质为 316L 不锈钢, 其锻造温度区间较窄<sup>[4-5]</sup>, 锻件容易出现裂纹, 温度对其变形抗力及金属流动的影响较大。河南科技大学郜建新等<sup>[6]</sup>研究了 316L 不锈钢套筒的热挤压工艺, 研究表明对 316L 不锈钢的变形抗力影响最大的

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 院所双创基金 (203SC202101-18)

作者简介: 刘光辉 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liu0406gh@163.com

通信作者: 刘 华 (1962-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员

E-mail: 13903832971@163.com

是变形温度,随着变形温度的增加,变形抗力降低。当变形温度为 1150 ℃ 及以上时,316L 不锈钢的变形抗力变化小且较平稳;在 1150 ℃ 以下时,变形抗力变化较大且剧烈。北京科技大学宋仁伯等<sup>[7]</sup>研究了 316L 不锈钢的冷变形加工硬化机制及组织特征。

本文提出了一种新的 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺,结合零件特点,制定了多轴联动成形工艺,具体的成形工艺为:将带锯床锯切完成的圆棒料放入模具中,通过多向数控联动成形压机对坯料各个方向施加压力,使材料产生相应的塑性变形,最终完成阀体锻件的成形。本文中,首先制定多轴联动成形工艺,然后使用 Deform-3D 对成形过程进行模拟分析并优化,再根据优化的工艺进行模具设计和工艺试验验证。本文研究对该类零件的多轴联动成形工艺具有一定的指导意义。

## 1 零件成形工艺分析

T 形不锈钢阀体的结构如图 1 所示,零件端部和中间的截面相差较大,采用圆棒料一次成形,变形量较大,需要合理考虑工艺和初始金属材料分配等,以保证锻件充填饱满。图 2 为 T 形不锈钢阀体锻件三维图。



图 1 T 形不锈钢阀体结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of T-shaped stainless steel valve body structure

### 1.1 工艺方案制定

首先,根据等截面和等体积原则,确定坯料规格为  $\Phi 60 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。但是,考虑到在计算机模拟过程中,由于坯料会不断重新划分网格<sup>[8]</sup>导致体积损失,因此,需要加长坯料。为保证锻件充填饱满,最终确定坯料的尺寸为  $\Phi 60 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ 。最后,根据等体积原则,计算出带法兰一侧需要的材料。最终制定如下工艺方案:(1)顶杆顶出 5 mm,以保证金属材料的合理分配,同时上冲头与坯料之间预留 20 mm,以便金属流动,如图 3a 所示;(2)左、右冲头同时向前运动,与此同时顶杆退回,如图 3b

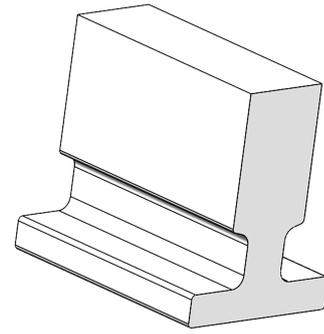


图 2 T 形不锈钢阀体锻件三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of T-shaped stainless steel valve body forgings

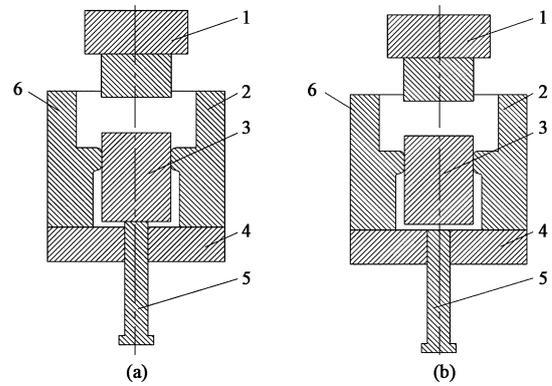


图 3 初始分料 (a) 和分料完成 (b) 示意图

1. 上冲头 2. 右冲头 3. 坯料 4. 底模 5. 顶杆 6. 左冲头

Fig. 3 Schematic diagrams of initial material separation (a) and material separation completion (b)

所示,左、右冲头运动 21 mm 后停止运动;(3)上冲头向下运动,直至锻件充填饱满。

### 1.2 316L 不锈钢的真应力-真应变曲线

本文采用 Deform-3D 数值模拟软件对 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺进行模拟,由于材料库中 316L 材料的流变应力曲线仅有 900 和 1100 ℃ 的数据,无法真实反映材料的高温力学性能,因此,为了提高模拟结果的准确性,需要增加 316L 不锈钢材料的高温力学性能数据。基于 Gleeble-1500D 热模拟试验机的试验数据,选择变形温度为 900~1200 ℃、应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形量为 75%,设计的试验方案如表 1 所示。在试验过程中,实时记录变形过程中的变形时间、载荷、变形温度、应力和应变等参数的变化,进而得出相应的数据。利用 Origin 软件对得到的数据进行处理,得到 316L 不锈钢的真应力-真应变曲线,如图 4 所示。将数据导入 Deform-3D 材料库中进行 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺模拟。

表 1 高温压缩试验方案

| 试样编号 | 变形温度/℃ | 应变速率/s <sup>-1</sup> | 压缩道次 | 变形量/% |
|------|--------|----------------------|------|-------|
| 01   | 900    | 0.1                  | 1    | 75    |
| 02   | 950    | 0.1                  | 1    | 75    |
| 03   | 1000   | 0.1                  | 1    | 75    |
| 04   | 1050   | 0.1                  | 1    | 75    |
| 05   | 1100   | 0.1                  | 1    | 75    |
| 06   | 1150   | 0.001                | 1    | 75    |
| 07   | 1150   | 0.1                  | 1    | 75    |
| 08   | 1150   | 1.0                  | 1    | 75    |
| 09   | 1200   | 0.1                  | 1    | 75    |

## 2 成形工艺的数值模拟

本文采用 Deform-3D 数值模拟软件对 T 形不锈钢阀体多轴联动成形工艺进行模拟。图 5 为 T 形不锈钢阀体多轴联动成形的有限元模型，主要由上冲头、后压头、右冲头、前压头、坯料、底模、左冲头和顶杆构成。主要工艺步骤如下：左、右冲头同时以 15 mm · s<sup>-1</sup> 的速度向前运动，到达设定行程后停止运动，之后上冲头以 15 mm · s<sup>-1</sup> 的速度向下运动，到达设定行程后停止运动，成形结束。材料选用自定义的 316L 不锈钢、摩擦因数设为 0.3、环境

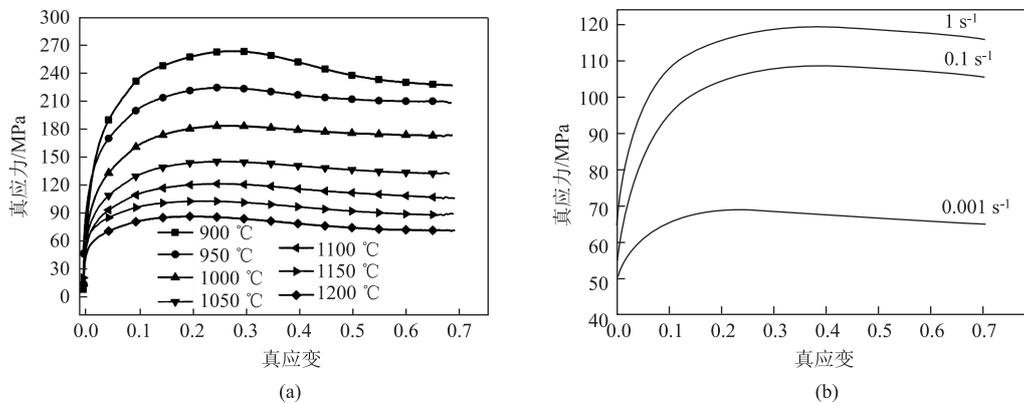


图 4 不同变形条件下 316L 不锈钢的真应力-真应变曲线

(a) 应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> (b) 变形温度为 1150 °C

Fig. 4 True stress-true strain curves of 316L stainless steel under different deformation conditions

(a) Strain rate of 0.1 s<sup>-1</sup> (b) Deformation temperature of 1150 °C

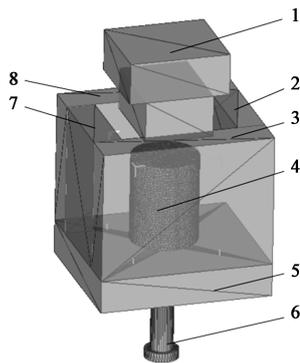


图 5 T 形不锈钢阀体多轴联动成形有限元模型

1. 上冲头 2. 右冲头 3. 前压头 4. 坯料 5. 底模  
6. 顶杆 7. 左冲头 8. 后压头

Fig. 5 Finite element model of multi-axis linkage forming process for T-shaped stainless steel valve body

温度设为 20 °C、坯料温度设为 1150 °C。采用热力耦合进行模拟计算<sup>[9]</sup>，模具温度设为 250 °C，热交换系数设为 8 W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>，网格划分采用四面

体网格，数量为 100000 个<sup>[10-12]</sup>。图 6 为成形过程中坯料的变形过程。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 载荷-时间曲线

图 7 为无热力耦合模拟的 T 形不锈钢阀体多轴联动成形过程中上冲头的载荷-时间曲线，图 8 为有热力耦合时上冲头的载荷-时间曲线。从图 7 和图 8 中可以看出，曲线主要分为 3 个阶段：第 1 阶段，上冲头的载荷为零，主要是因为此时上冲头并未与坯料接触；第 2 阶段，随着变形的继续，上冲头与坯料接触，此过程坯料并未与周围模具接触，属于自由镦粗阶段，因此载荷较小；第 3 阶段，随着变形量的增大，坯料与周边模具全部接触，并逐渐形成封闭模腔，此时金属流动空间逐渐减小，需要更大的成形力才能使金属流动，因此成形载荷急剧增加。

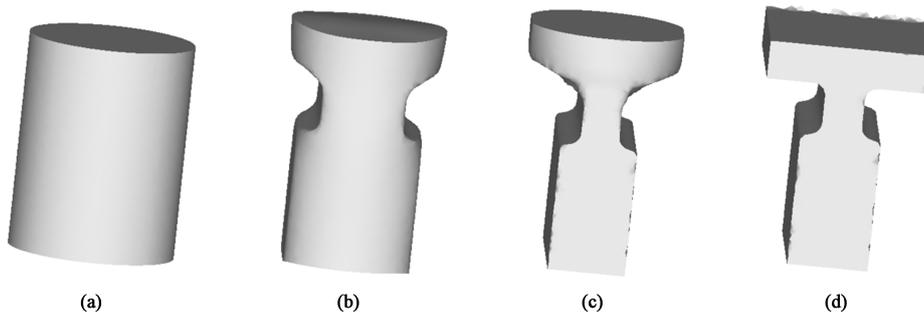


图 6 成形过程中坯料的变形过程

(a) 第 1 步 (b) 第 30 步 (c) 第 90 步 (d) 第 115 步

Fig. 6 Deformation process of blank in forming process

(a) Step 1 (b) Step 30 (c) Step 90 (d) Step 115

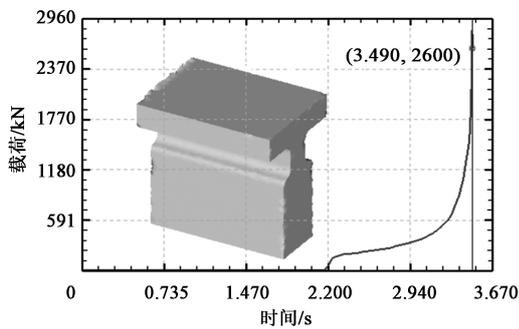


图 7 无热力耦合时上冲头载荷-时间曲线

Fig. 7 Load-time curve of upper punch without thermal mechanical coupling

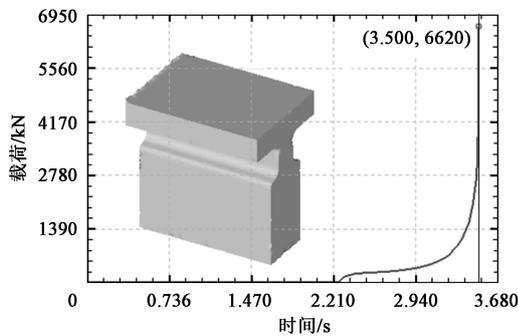


图 8 有热力耦合时上冲头载荷-时间曲线

Fig. 8 Load-time curve of upper punch with thermal mechanical coupling

图 9 为两条曲线的对比图, 通过进一步对比两条曲线发现: 在第 1 阶段和第 2 阶段, 两条曲线基本重合, 上冲头的载荷基本一致; 随着变形程度的增加, 两条曲线逐渐出现差异, 主要表现为在最后阶段, 有热力耦合模拟时上冲头的最大载荷为 6620 kN, 无热力耦合模拟时上冲头的最大载荷为 2600 kN, 相差甚大。发生此现象的主要原因在于坯料温度的降低, 有热力耦合模拟时, 在最后阶段坯料温度降低, 其热变形抗力急剧增加, 因此成形载荷较大。此现象同时也说明了 316L 不锈钢的热变形

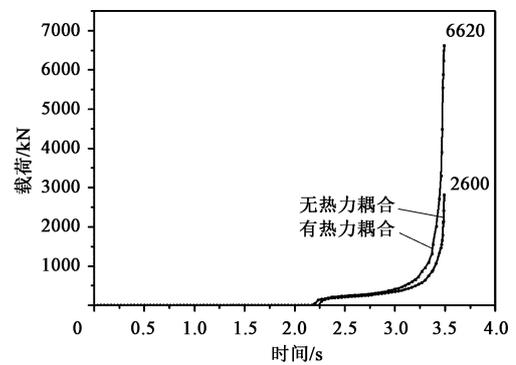


图 9 有无热力耦合时上冲头的载荷-时间曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-time curves for upper punch with or without thermal mechanical coupling

抗力对温度的敏感性, 同时也为选择设备吨位提供了理论依据。

### 3.2 等效应力分布

图 10 为成形过程中第 30 步、90 步、115 步时坯料的等效应力场分布图。从图 10 中可以看出, 在 T 形阀体变形的各个阶段, 其等效应力变化不均匀。在变形初始阶段, 坯料等效应力值较小, 属于自由变形阶段, 坯料变形需要的力也较小, 如图 10a 所示。随着变形的继续, 坯料逐渐与周边模具接触紧密, 接触面积逐渐增大, 等效应力值逐渐变大, 如图 10b 所示。在变形的最后阶段, 金属与周围模具形成封闭空间, 金属流动阻力逐渐增大, 必须施加更大的力才能使金属继续变形, 直至锻件充填饱满, 此时等效应力值较大, 且最大值出现在锻件的边角处, 为 600 MPa, 如图 10c 所示, 该位置在模具设计时应重点关注和考虑, 以免造成模具开裂。

### 3.3 温度场分布

由于 316L 不锈钢的锻造温度较窄, 温度的变化对成形过程的影响较大, 因此, 要想获得合格的锻

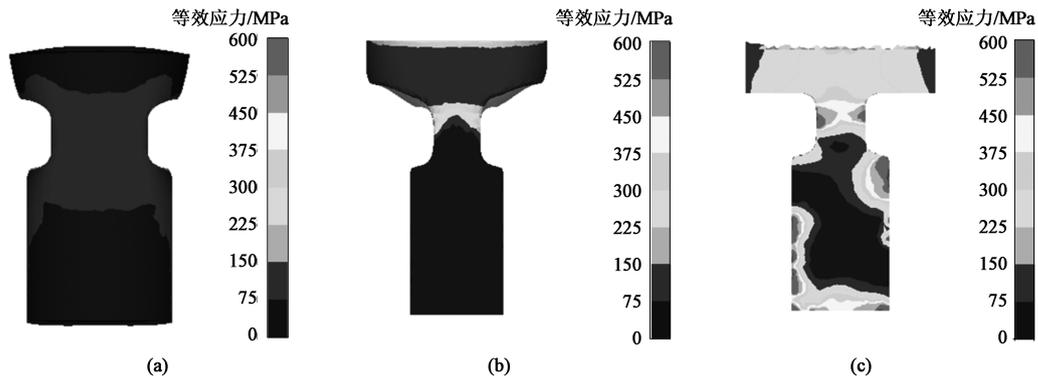


图 10 成形过程中等效应力场分布

(a) 第 30 步 (b) 第 90 步 (c) 第 115 步

Fig. 10 Distributions of equivalent stress fields in forming process

(a) Step 30 (b) Step 90 (c) Step 115

件，锻造过程必须在材料的锻造温度区间内完成。如果温度达不到 316L 不锈钢的锻造温度或者表面温度与心部温度分布不均匀，就会使得锻造过程中的成形力较大，甚至难以成形，这不仅对设备吨位的要求更高，而且还会导致坯料的变形不均匀，对模具产生破坏作用。但温度过高会使得锻件出现过热或过烧、晶粒粗大的现象，甚至出现裂纹等锻造缺陷。因此，分析成形过程中的温度场分布是十分必要的。

图 11 为成形过程中的温度场分布图，由图 11 可知，温度降低的地方总是出现在坯料与模具接触的区域。成形初始阶段，左、右冲头与坯料接触，如图 11a 所示，由于模具温度较低，坯料与模具之间存在较大的温度差，因此，坯料通过热传递将热量传至左、右冲头，使得自身的温度有所降低，因此，坯料左右两端的温度下降，而此时上冲头尚未

与坯料接触，未与模具发生热传递，仅与周围空气发生热交换，温度下降不明显，因此温度较高。随着变形程度的增加，上冲头开始接触坯料并锻挤成形，如图 11b 所示，坯料上、下两端的温度同样是由于和模具发生热传递而开始下降。在成形结束时，锻件边角处的温度较低，如图 11c 所示，因此热变形抗力变大，必须施加更大的力才能使其继续变形，进而充填整个模具型腔。一般在热锻成形过程中，必须提前预热模具，这不仅能够提高金属的流动性，还能避免模具温度过低而导致模具断裂。

#### 4 模具结构设计

图 12 为 T 形不锈钢阀体多轴联动成形模具的三维结构图，图 13 为 T 形不锈钢阀体多轴联动成形模具的装配图。坯料放置在前压头和后压头之间，先通过左冲头和右冲头的相向运动，实现对坯料左右

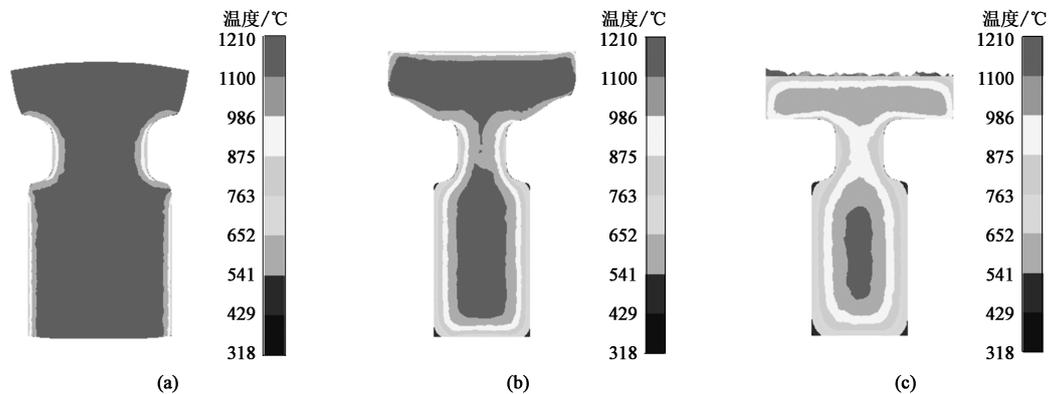


图 11 成形过程中温度场分布

(a) 第 30 步 (b) 第 90 步 (c) 第 115 步

Fig. 11 Distributions of temperature field in forming process

(a) Step 30 (b) Step 90 (c) Step 115

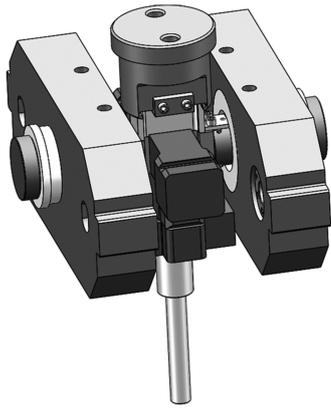


图 12 T 形不锈钢阀体多轴联动成形模具的三维结构图  
Fig. 12 Three-dimensional structure diagram of multi-axis linkage forming die for T-shaped stainless steel valve body

两个方向上的挤压成形，再通过上冲头的下压，最终将坯料挤压成形为 T 形不锈钢阀体毛坯。该装置的成形效率高，模具结构简单，便于加工和快速更

换模具，以实现自动化生产。

## 5 工艺试验

将加工完成的 T 形不锈钢阀体多轴联动成形模具安装于多向数控压机上进行模具调试和工艺试验。图 14 为试验用多向数控联动成形压机，该设备有 5 个方向可以联动，主缸为 1000 t，左、右缸为 800 t，后缸为 300 t，顶出缸为 200 t，适用于各种复杂零件的单工位多向锻造成形。多向压机的具体动作流程为：首先，将加热完成的圆棒料放入模具中，左、右缸向前运动，到达设定位置后停止，此时左、右冲头与圆棒料间有较小的间隙，以保证顶出缸顶出时圆棒料不会倾斜；然后，顶出缸顶出 5 mm 后停止，接着左、右缸开始以一定速度向前运动，与此同时顶出缸退回至初始位置，左、右缸运动到设定位置后停止运行，然后主缸以一定速度向下运动，

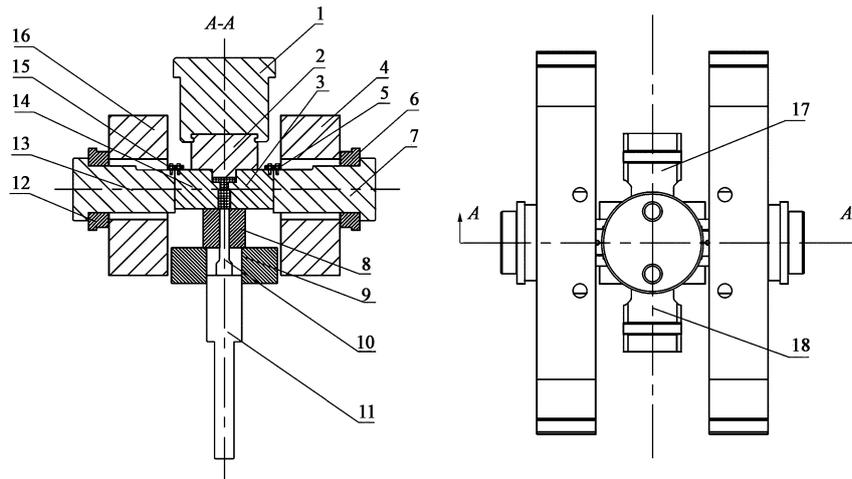


图 13 T 形不锈钢阀体多轴联动成形模具的装配图

1. 上冲头连接块 2. 上冲头 3. 右冲头 4. 右支撑板 5. 右冲头连接板 6. 右冲头限位套 7. 右冲头接杆 8. 底模 9. 垫块 10. 上顶杆  
11. 下顶杆 12. 左冲头限位套 13. 左冲头接杆 14. 左冲头 15. 左冲头连接板 16. 左支撑板 17. 后压头 18. 前压头

Fig. 13 Assembly diagram of multi-axis linkage forming die for T-shaped stainless steel valve body

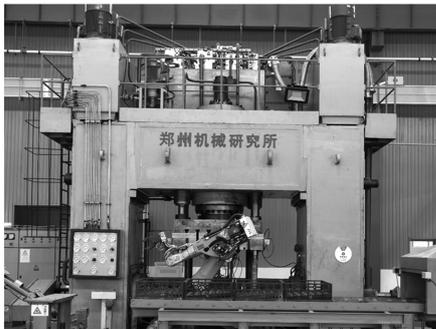


图 14 多向数控联动成形压机

Fig. 14 Multi-directional NC linkage forming press

到达指定位置后停止运动；最后，主缸和左、右缸退回至初始位置，顶出缸顶出锻件，成形结束。

图 15 为试验得到的 T 形不锈钢阀体锻件实物图，利用线切割将试验得到的锻件沿纵向切开，利用平面磨床将其表面磨平，然后抛光，最后用温度较高的盐酸水溶液（1 : 1 配制）腐蚀一段时间后观察其截面的金属流线分布，如图 16 所示。从图 16 可以看出，金属流线分布情况良好，基本沿着锻件轮廓方向分布，未出现流线缺陷。

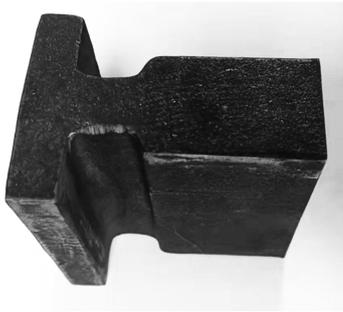


图 15 T 形不锈钢阀体锻件

Fig. 15 T-shaped stainless steel valve body forgings



图 16 锻件金属流线分布

Fig. 16 Metal streamline distribution of forgings

## 6 结论

(1) 通过有限元模拟, 得到了优化的工艺参数, 为工艺试验奠定了基础。

(2) 通过数值模拟和试验验证, 确立了稳定的成形工艺参数和可靠性较高的模具结构, 试验锻件充填饱满, 金属流线分布合理, 说明本文提出的 T 形不锈钢阀体多轴联动精密成形工艺的可行性高, 可为该类零件的生产制造提供指导。

### 参考文献:

- [1] 秦晓兰, 苏建龙, 陈友方. 国内外阀门开发现状比较分析 [J]. 技术与市场, 2009, 16 (4): 69-70.  
Qin X L, Su J L, Chen Y F. Comparative analysis of the current situation of domestic and foreign valve development [J]. Technology and Market, 2009, 16 (4): 69-70.
- [2] 孙丽, 陈立龙. 我国阀门行业现状与发展趋势 [J]. 机电工程, 2009, 26 (10): 103-104.  
Sun L, Chen L L. Present situation and development trend of valve industry in China [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2009, 26 (10): 103-104.
- [3] 宋银立. 我国阀门行业面临的形势和任务 [J]. 通用机械, 2012, (7): 22-24.
- [4] 裴文娇, 郭训忠, 王文涛, 等. 316L 奥氏体不锈钢的高温流变行为 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (3): 104-110.  
Pei W J, Guo X Z, Wang W T, et al. Flow behaviors of 316L stainless steel at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (3): 104-110.
- [5] 宋仁伯, 项建英, 刘良元, 等. 316L 不锈钢的热变形抗力模型 [J]. 机械工程材料, 2010, 34 (6): 85-89.  
Song R B, Xiang J Y, Liu L Y, et al. Hot deformation resistance model of 316L stainless steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34 (6): 85-89.
- [6] 郜建新, 赵培峰, 宋克兴, 等. 316L 不锈钢套筒热挤压工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (1): 95-97.  
Gao J X, Zhao P F, Song K X, et al. Study on hot extrusion process of 316L stainless steel sleeve [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (1): 95-97.
- [7] 宋仁伯, 项建英, 侯东坡. 316L 不锈钢冷变形加工硬化机制及组织特征 [J]. 工程科学学报, 2013, 35 (1): 55-60.  
Song R B, Xiang J Y, Hou D P. Cold deformation work hardening mechanism and microstructure characteristics of 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Engineering, 2013, 35 (1): 55-60.
- [8] 王熠昕, 权国政, 黄文超. 汽车万向节叉热挤压成形的数值模拟分析 [J]. 精密成形工程, 2010, 2 (6): 60-63.  
Wang Y X, Quan G Z, Huang W C. Simulation analysis of hot extrusion forming for universal joint fork of automobile [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2 (6): 60-63.
- [9] 唐庆顺, 杨元慧, 卢森加, 等. 汽车转向节模锻工艺改进 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (19): 128-130.  
Tang Q S, Yang Y H, Lu S J, et al. Die forging process improvement of automobile steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (19): 128-130.
- [10] 李素丽, 张治民. 三通阀体零件多向主动加载成形过程数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (5): 69-71.  
Li S L, Zhang Z M. Numerical simulation of more active loading process of triple valve body [J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (5): 69-71.
- [11] 郭晓锋, 杨合, 孙志超, 等. 三通件多向加载成形热力耦合有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (4): 85-90.  
Guo X F, Yang H, Sun Z C, et al. Coupled thermal-mechanical FEM analysis on multi-way loading forming process of triple valve body [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (4): 85-90.
- [12] 刘丹. 斜齿圆柱齿轮冷精密成形工艺及数值模拟研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2008.  
Liu D. Research on Cold Precision Forming Process and Numerical Simulation of Helical Cylindrical Gear [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2008.