

管材成形

## 汽车用薄壁管件预制坯设计及成形工艺模拟

杨 忠<sup>1</sup>, 王彦凤<sup>2</sup>

(1. 河北省玉田县职业技术教育中心, 河北 唐山 064100; 2. 华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063210)

**摘要:**为解决某型号汽车薄壁管件机械加工产生的材料利用率低、成本高等问题,提出了采用闭式挤压制坯后车削成形的加工方式。根据管件特征,对难成形部位结构进行了改进,设计了3种不同形状的预制坯,分别进行了成形模具的简化设计,并利用 Deform-3D 软件进行了数值分析。通过材料流动情况分析各方案预制坯的成形过程,说明了各方案是否存在潜在缺陷,同时对比了不同方案材料利用率、成形载荷以及模具磨损。结果表明:方案1的材料利用率最高,但存在成形缺陷和模具损坏风险;方案2和方案3能够获得符合要求的预制坯形状,但方案2存在脱模不良的问题,而方案3在材料利用率、成形载荷以及模具磨损等方面均较为理想。最终通过方案3获得了符合要求的薄壁管件,生产效果好,解决了材料利用率低的问题。

**关键词:**薄壁管件;闭式挤压;预制坯;材料利用率;模具磨损

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.013

**中图分类号:** TG376.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0102-09

## Preformed billet design and forming process simulation for automobile thin-walled pipe

Yang Zhong<sup>1</sup>, Wang Yanfeng<sup>2</sup>

(1. Hebei Yutian Vocational and Technical Education Center, Tangshan 064100, China;

2. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low material utilization rate and high cost caused by the machining for a certain type of automobile thin-walled pipe, a processing method of turning after closed extruded billet was proposed, and according to the characteristics of pipe, the structure of the difficult forming parts was improved. Then, three kinds of preformed billet with different shapes were designed, the simplified design of the forming mold was carried out, and the numerical analysis was carried out by software Deform-3D. Furthermore, the forming process of the preformed billet for each scheme was analyzed through the material flow situation, and the potential defects of each scheme were explained. At the same time, the material utilization rate, the forming load and the mold wear of different schemes were compared. The results show that scheme 1 has the highest material utilization rate, but there are forming defects and mold damage risks. Scheme 2 and scheme 3 can obtain the required preformed billet shape, but scheme 2 has the problem of poor demoulding, while scheme 3 is ideal in terms of material utilization rate, forming load and mold wear. Finally, the qualified thin-walled pipe is obtained through scheme 3, which has good production effect and solves the problem of low material utilization rate.

**Key words:** thin-walled pipe; closed extrusion; preformed billet; material utilization rate; mold wear

近两年受疫情影响,汽车行业受到巨大的冲击,在当前原材料价格上涨、生产周期紧张、运输成本高昂和人力资源匮乏的市场大环境中,许多汽车零部件生产商面临较大的挑战,急需加快技术突破,完成生产工艺改进,在保证零件产量的同时控制生产成本,以实现营收。本文以唐山某企业某种汽车薄

壁管件为研究对象,该管件为汽车上的重要连接件,为回转体零件,如图1所示。现阶段主要通过机加工的方式生产,材料利用率仅有25.6%,造成了严重的浪费,因此,针对性地提出了采用闭式挤压制坯后车削成形的加工方式,利用塑性成形技术<sup>[1-3]</sup>,通过材料转移完成零件的预成形,以达到降低材料切除量的目的。

随着计算机技术的发展,对于工艺的设计研究逐渐从传统的经验法、试错法转为更科学的有限元模拟方法<sup>[4]</sup>,从而有效地确保风险的可控性,效率

收稿日期: 2022-04-16; 修订日期: 2022-07-15

作者简介: 杨 忠 (1971-), 男, 学士, 高级讲师

E-mail: yangz197110@163.com

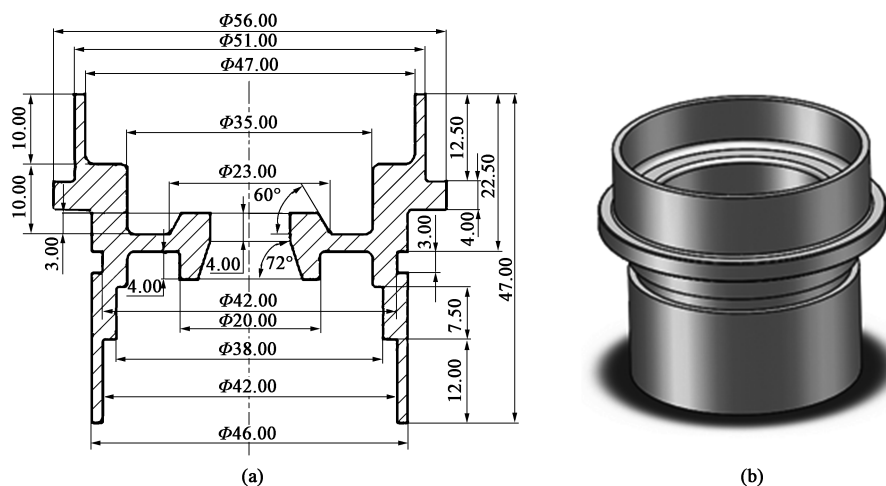


图1 汽车薄壁管件零件图

(a) 尺寸图 (b) 三维模型

Fig. 1 Part drawings of automobile thin-walled pipe

(a) Dimension drawing (b) Three-dimensional model

更高且成本更低。陈金霞等<sup>[5]</sup>通过 Deform-3D 软件对一种伞齿轮的楔横轧工艺进行了研究,及时发现了材料折叠的缺陷,优化了模具结构,最终解决了原工艺材料利用率低、产品质量差的问题。张巍<sup>[6]</sup>通过 Deform-3D 模拟找出了铝合金连接锻件产生折叠缺陷的原因,在原工艺基础上进行了改进,并优化了锻模结构,最终获得了性能良好的锻件。王耀等<sup>[7]</sup>为解决铸造阀体性能差、寿命短的问题,结合 Deform-3D 软件研究了一种多向模锻工艺,并确定了模具结构及各冲头的加载过程。丛兵兵等<sup>[8]</sup>通过 Deform-3D 软件对马车螺栓多工步成形进行了数值模拟,并根据成形缺陷优化了模具结构,同时通过实际试模同步检验,有效地解决了马车螺栓冷镦成形中出现的台阶及充不满缺陷。因此,本文采用有限元技术对汽车薄壁管件的闭式挤压工艺展开研究,综合分析材料利用率、成形载荷和模具磨损等因素,确定了最佳工艺。

## 1 零件结构分析及预制坯设计

由图1可知,汽车薄壁管件外部有凸台和凹槽,内部上、下两端均有阶梯状内孔,整体壁厚极其不均匀,最小为2.0 mm,最大为10.5 mm,并由通孔贯穿,结构比较复杂,无法直接成形。初步分析后,将外部凸台、凹槽、内部上下端薄壁以及通孔等不易挤出成形的结构通过后续车削成形。此外,管件存在过多转角,挤压过程中不利于金属的流动,导致需要较大的成形力,影响模具的使用寿命,并且

转角处也容易出现充不满的缺陷。因此,对管件难成形部位结构进行了一些改进,设计了3种预制坯形状,如图2中粗实线轮廓所示(图2中剖面线为实际管件形状),并分别进行了成形模具的简化设计,最终确定的3种闭式挤压方案,如图3所示。遵循等体积原理,依次确定各方案棒料尺寸为 $\Phi 47$  mm $\times$ 34.0 mm、 $\Phi 55$  mm $\times$ 29.5 mm 和  $\Phi 50$  mm $\times$ 32.5 mm,经计算可知,材料利用率分别为50.2%、42.2%和46.4%,与原工艺相比均有了较大提升,仅从材料利用率来看,方案1更优。

基于 Deform-3D 软件对3种方案下预制坯的成形情况和可行性进行研究,并综合成形载荷和模具磨损等因素对可行方案进行择优。

## 2 有限元建模

根据图3、采用UG完成3种闭式挤压模具结构的三维建模,取1/2结构,然后导入 Deform-3D 软件中进行有限元建模,具体为:

(1) 模型基本参数设置。选择热力耦合模拟形式<sup>[9]</sup>,选择坯料为塑性体,坯料材质为 AISI-4140 钢,其不同温度、应变速率下的流变行为可通过文献[10]获得,采用 Arrhenius 本构模型,拟合结果见式(1),并将对应数据输入至软件,如图4所示。选择模具为刚体,模具材质为 AISI-H13 钢。

$$\dot{\varepsilon} = e^{26.43} \sinh(0.0896\sigma)^{5.884} \cdot \exp\left(-\frac{427469}{8.314T_{\text{abs}}}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $\sigma$ 为峰值应力, MPa;

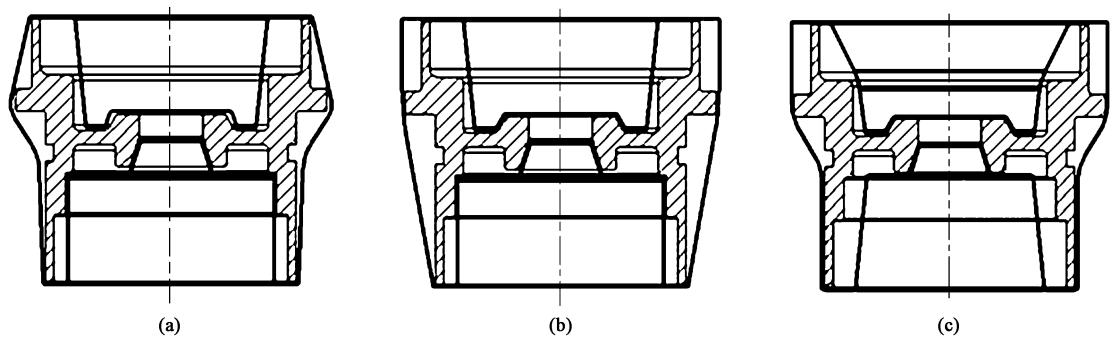


图 2 汽车薄壁管件预制坯形状  
(a) 形状 1 (b) 形状 2 (c) 形状 3  
Fig. 2 Preformed billet shapes of automobile thin-walled pipe  
(a) Shape 1 (b) Shape 2 (c) Shape 3

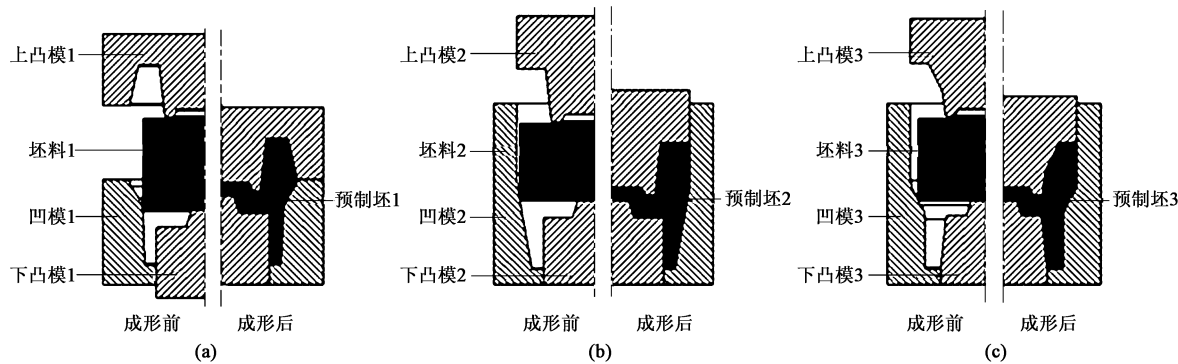


图 3 3 种闭式挤压方案  
(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3  
Fig. 3 Three closed extrusion schemes  
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

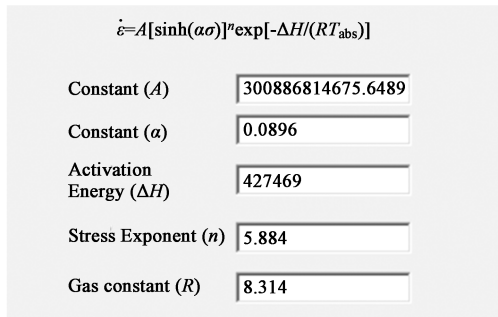


图 4 本构模型建立界面  
Fig. 4 Interface of creating constitutive model

$T_{\text{abs}}$  为热力学温度, K。

(2) 网格划分。采用四面体进行网格划分, 坯料划分数量为 80000 个, 上凸模、凹模划分数量为 32000 个, 下凸模划分数量为 10000 个。

(3) 温度及接触关系设置。坯料加热温度为 1050 ℃, 模具预热温度为 300 ℃, 定义坯料以及与坯料接触的模具表面为传热面, 热传递系数为

$11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。定义坯料与上凸模、凹模以及下凸模之间为剪切摩擦方式, 摩擦因数为 0.3。

(4) 运动定义。各方案模具运动情况如表 1 所示。

表 1 模具运动方案 (mm · s<sup>-1</sup>)

Table 1 Schemes of mold motion (mm · s<sup>-1</sup>)

模具	方案 1	方案 2	方案 3
上凸模	13.5 (-Z 向)	14.0 (-Z 向)	15.0 (-Z 向)
下凸模	2.5 (Z 向)	固定	固定
凹模	固定	固定	固定

(5) Archard 磨损模型建立。对于热挤压, 成形中温度变化较大, 会影响模具的磨损性能, 因此, 参考相关文献<sup>[11-12]</sup>, 建立式 (2) 所示的修正模型。

$$W = \int (29.29 \ln T - 168.73) \times \frac{pv}{9216.4 T^{-0.505}} dt \quad (2)$$

式中:  $W$  为模具的磨损深度, mm;  $T$  为温度, ℃;  $p$

为接触压力, MPa;  $v$  为材料流动速度,  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $t$  为时间, s。

(6) 模拟控制设置。3种方案均以上凸模为主模, 结束条件分别为沿 $-Z$ 向移动位移达27、28

和30 mm, 各方案模拟步长均取0.1 mm, 因此, 模拟步数分别为270步、280步和300步, 均设置每10步保存1次。各方案有限元建模结果如图5所示。

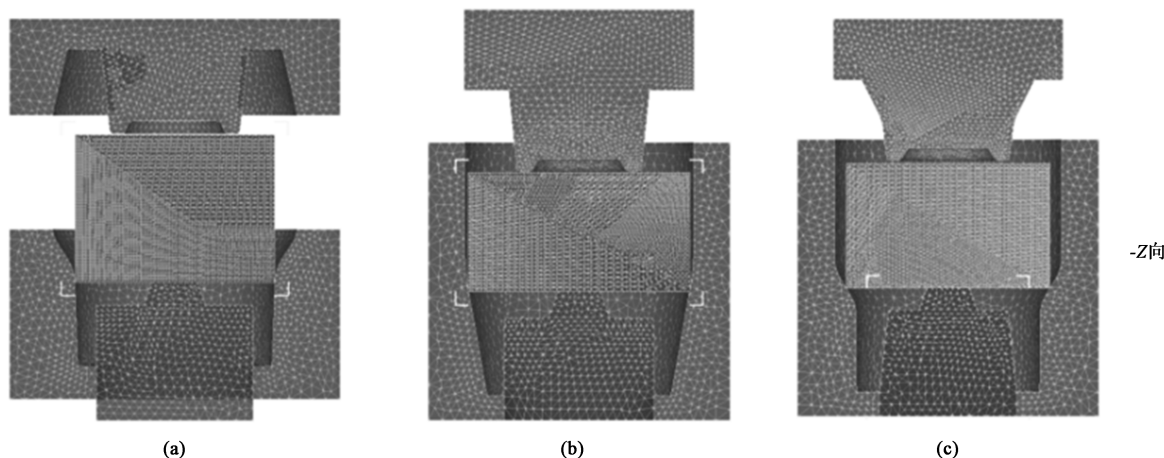


图5 各方案有限元模型

(a) 方案1 (b) 方案2 (c) 方案3

Fig. 5 Finite element models of each scheme

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

### 3 各方案模拟结果对比与分析

#### 3.1 材料流动分析

方案1下的材料流动过程如图6所示, 挤压开始后, 材料向下流动进入凹模与下凸模之间的型腔, 完成下端内孔凸台及薄壁的成形; 到成形中期, 随着坯料与模具接触面积的迅速增加, 阻力变大后, 材料向下流动停滞, 转向阻力更小的横向流动, 同时向上快速充填上凸模型腔; 到成形后期, 预制坯其他部位填充完成后, 材料被迫继续向下流动填充下端薄壁, 但由于阻力增大, 使得材料更多地向上凸模与凹模之间的型腔外流动, 形成横向飞边, 如图6d中A区域所示, 会造成模具损坏, 最终成形的预制坯下端薄壁也会因材料过度流失而出现填充不满的缺陷, 如图6d中B区域所示。

方案2材料流动过程如图7所示, 受上凸模作用, 材料首先迅速向下流动完成下端内孔凸台的成形; 然后流入薄壁型腔, 但由于阻力过大, 向下流动停滞, 在图7b中, 成形中期材料向薄壁型腔流动速度最低, 此阶段材料以向上流动为主, 优先充填预制坯上端, 直至与上凸模底部端面完全接触; 到成形后期, 材料下端流动速度最快, 因为此时材料仅能向薄壁底角流动完成最后的填充。由图7d可

知, 最终零件与各模具均完全接触, 充填完整, 材料流动正常, 零件内部无缺陷产生。但从材料的最终流向可知, 其为向内流动的趋势, 与下凸模存在粘结风险, 从而影响脱模。

方案3下的材料流动过程如图8所示, 在上凸模作用下材料向下流动完成下端内孔凸台的成形, 并开始下端薄壁的成形, 但受摩擦阻力作用, 向下流动停滞, 开始横向流动镦粗坯料; 到成形中期, 横向流动的材料与凹模壁充分接触, 而材料向下流动仍然困难, 因此, 材料更多地向上流动优先成形预制坯上端, 直至完全成形后, 再向下充填下端薄壁。该方案成形过程与方案2的大体相同, 材料流动正常, 无缺陷产生, 最终成形零件充填饱满, 并且从材料的最终流向可知, 其为向外流动的趋势, 不会与下凸模出现粘结, 能够实现顺利脱模。

#### 3.2 成形载荷分析

由于方案1无法获得完整成形的预制坯, 因此, 仅对方案2和方案3进行分析比较。方案2和方案3成形载荷随时间的变化曲线如图9所示, 从图9a可知, 方案2下的成形载荷变化过程分为4个阶段: C1D1阶段, 成形下端薄壁阻力较大, 因此, 主要成形预制坯上部, 成形载荷随着坯料与模具接触面的增加而增加, 增长比较平稳; D1E1阶段, 开始成形下端薄壁, 成形载荷迅速增长至某个点从而克



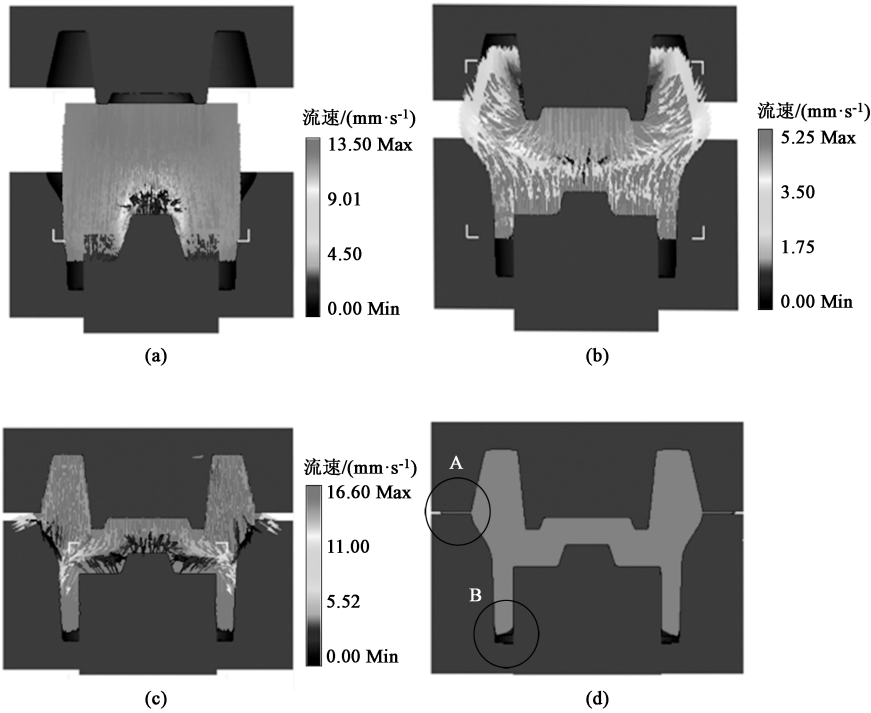


图 6 方案 1 下的材料流动过程及零件成形结果

(a) 成形前期 (b) 成形中期 (c) 成形后期 (d) 成形零件 1

Fig. 6 Material flow process and part forming results of scheme 1

(a) Early stage of forming (b) Middle stage of forming (c) Later stage of forming (d) Formed part 1

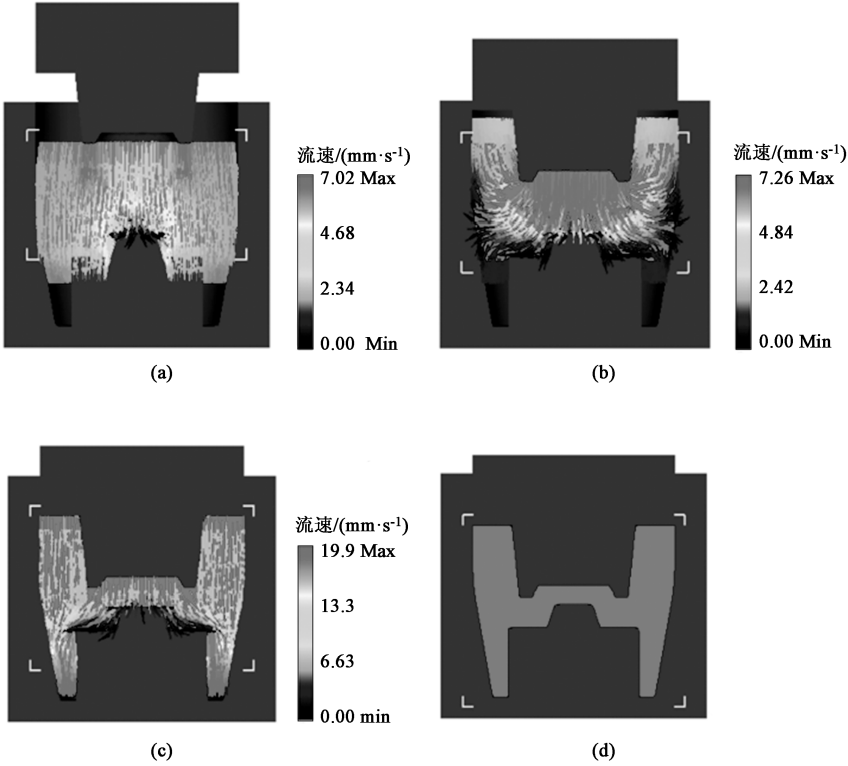


图 7 方案 2 下的材料流动过程及零件成形结果

(a) 成形前期 (b) 成形中期 (c) 成形后期 (d) 成形零件 2

Fig. 7 Material flow process and part forming results of scheme 2

(a) Early stage of forming (b) Middle stage of forming (c) Later stage of forming (d) Formed part 2

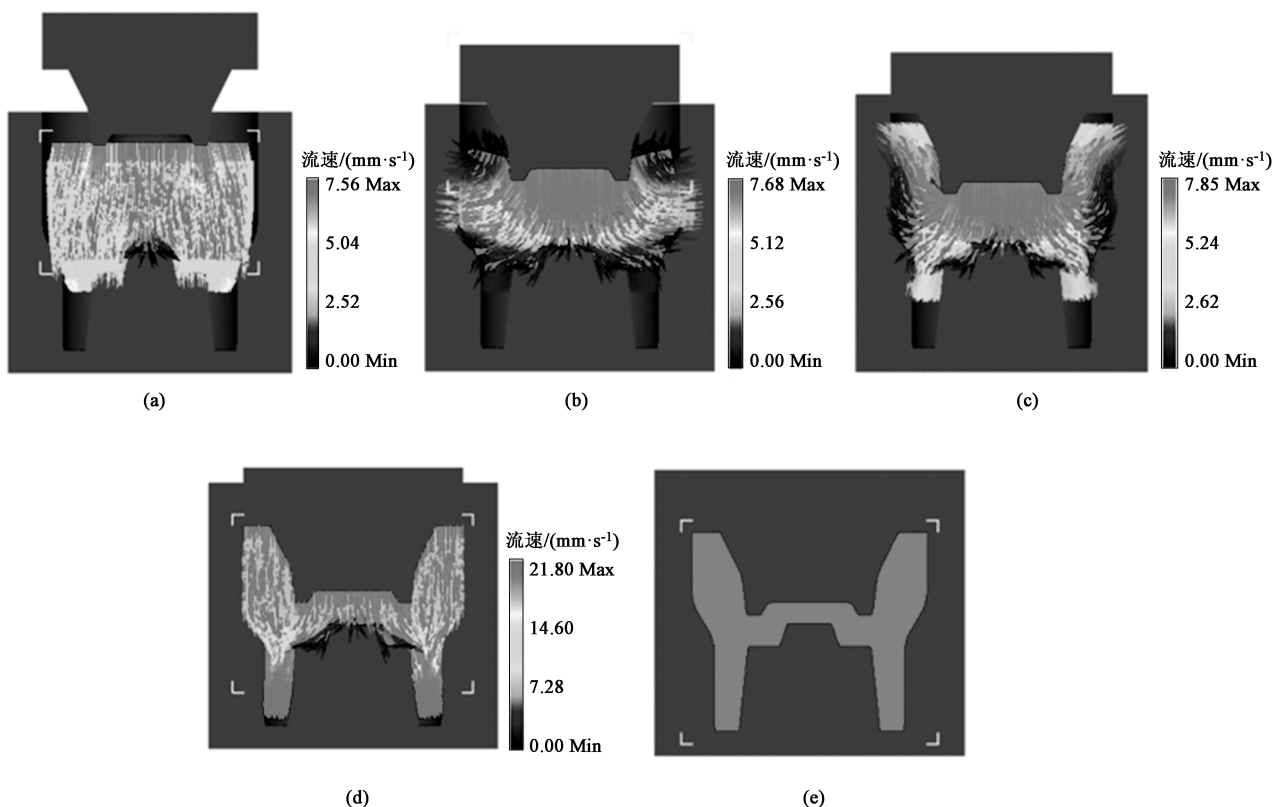


图8 方案3下的材料流动过程及零件成形结果

(a) 成形前期 (b) 成形前中期 (c) 成形中期 (d) 成形后期 (e) 成形零件3

Fig. 8 Material flow process and part forming results of scheme 3

(a) Early stage of forming (b) Prometaphase stage of forming (c) Middle stage of forming (d) Later stage of forming (e) Formed part 3

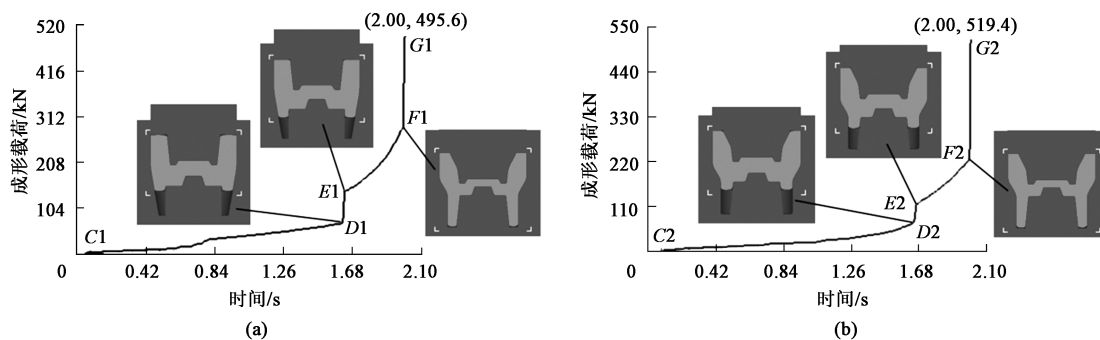


图9 成形载荷-时间变化曲线

(a) 方案2 (b) 方案3

Fig. 9 Forming load-time variation curves

(a) Scheme 2 (b) Scheme 3

服了阻力,促使材料流向薄壁型腔; $E1F1$ 阶段,稳定填充下端薄壁,成形载荷随着坯料与模具接触面的增加而增加; $F1G1$ 阶段,预制坯基本成形结束,闭式模腔限制了材料的流动,同时摩擦阻力和材料的变形抗力达到最大,使得成形载荷迅速增长至最大值,最大成形载荷为495.6 kN。方案3下的成形载荷随时间的变化过程如图9b所示,同为4个阶段且与方案2结果完全相同,最大成形载荷为519.4 kN,

较方案2增加了4.8%。

### 3.3 模具磨损分析

方案2经1次闭式挤压后的模具磨损情况如图10a和图10b所示,上凸模上端面外侧圆角周边磨损最为严重,因为该处与坯料接触时间最长,材料流动最为剧烈,最大磨损深度达到 $3.41 \times 10^{-5}$  mm;凹模模腔过渡圆角处磨损最大,此处材料向内收缩,摩擦剧烈,最大磨损深度为 $3.82 \times 10^{-5}$  mm。方案3

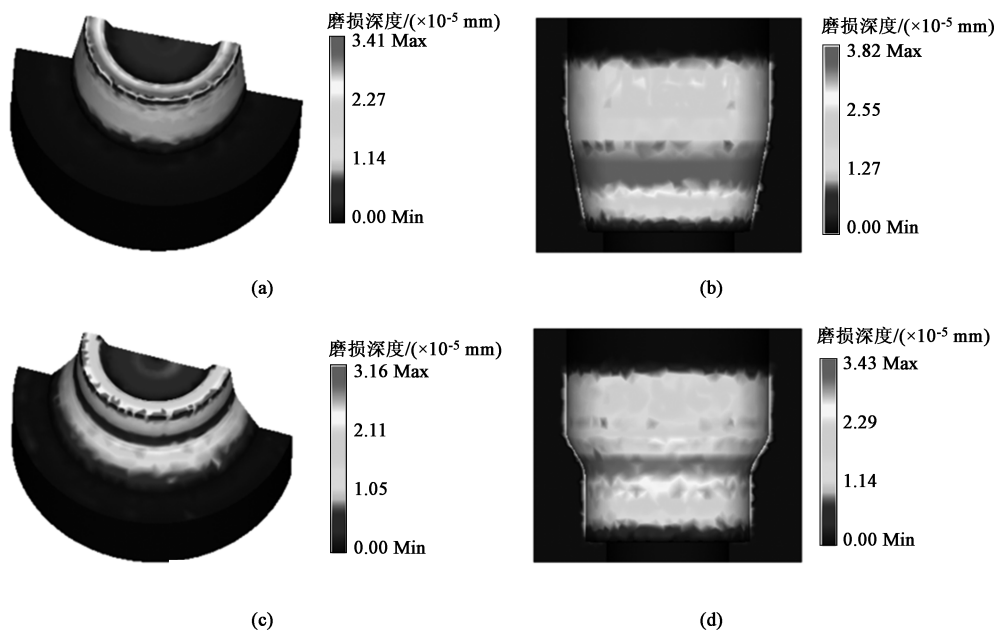


图 10 模具磨损分布云图

(a) 方案 2, 上凸模 (b) 方案 2, 凹模 (c) 方案 3, 上凸模 (d) 方案 3, 凹模

Fig. 10 Cloud diagrams of mold wear distribution

(a) Upper punch, scheme 2 (b) Lower die, scheme 2 (c) Upper punch, scheme 3 (d) Lower die, scheme 3

经 1 次闭式挤压后的模具磨损情况如图 10c 和图 10d 所示, 上凸模严重磨损部位与方案 2 相同, 为上凸模上端面外侧圆角周边, 最大磨损深度为  $3.16 \times 10^{-5}$  mm; 凹模最大磨损部位为模腔过渡圆角, 该处迫使材料收缩, 经历大量摩擦, 最大磨损深度为  $3.43 \times 10^{-5}$  mm。对比可知, 方案 3 上凸模及凹模最大磨损深度均小于方案 2, 能够延缓模具的磨损失效, 提高模具使用寿命。

#### 4 方案验证

结合上述分析可知, 虽然预制坯 1 的材料利用率最高, 但方案 1 闭式挤压下无法获得符合要求的预制坯形状, 并存在模具损坏的风险; 采用方案 2, 能够获得符合要求的预制坯形状, 最大成形载荷也相对方案 3 的较小, 但脱模存在一定问题; 而采用方案 3, 虽然最大成形载荷大于方案 2 的, 但差距较小, 仅为 4.8%, 对设备的影响较小, 除此之外, 材料利用率更高, 脱模不存在问题, 并且同等条件下, 模具磨损量也更低, 利于延缓模具的磨损失效时间, 因此, 选择预制坯 3、闭式挤压方案 3 为最佳方案。

采用闭式精密压力机 JM31-110 进行挤压试验, 挤压坯料为 AISI-4140 钢, 下料尺寸  $\Phi 50$  mm  $\times$

32.5 mm, 利用 SX2-10-12A 箱式电阻炉加热至 1050  $^{\circ}\text{C}$ , 模具预热温度为 300  $^{\circ}\text{C}$ , 以石墨乳为润滑剂, 压力机挤压速度为  $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 挤压获得的薄壁管件预制坯如图 11a 所示, 切开截面如图 11b 所示, 成形情况较好, 各处结构清晰, 无缺肉等问题, 与有限元分析结果 (图 11d 和图 11e) 一致。挤压试验中实际最大成形载荷为 542.7 kN, 与有限元模拟结果非常接近, 相差 4.5%, 说明建模较为准确。经车削加工后, 最终的薄壁管件如图 11c 所示, 切开截面如图 11f 所示, 产品良好, 完全能够达到厂家要求, 目前该工艺已正式投入生产, 材料利用率从 25.6% 提升至 46.4%, 有效地解决了材料利用率低的问题, 实现了降低成本的目的。

#### 5 结论

(1) 针对汽车薄壁管件当前工艺材料利用率低、成本高的问题, 提出了采用闭式挤压制坯后车削成形的生产方案, 通过预成形达到降低材料切除量的目的, 并通过 Deform-3D 有限元模拟和实际挤压试验对方案的可操作性进行了验证。

(2) 根据薄壁管件的特征, 设计了 3 种预制坯形状, 并设计了对应的 3 种闭式挤压方案, 从材料流动情况、预制坯的成形情况、材料利用率、成形

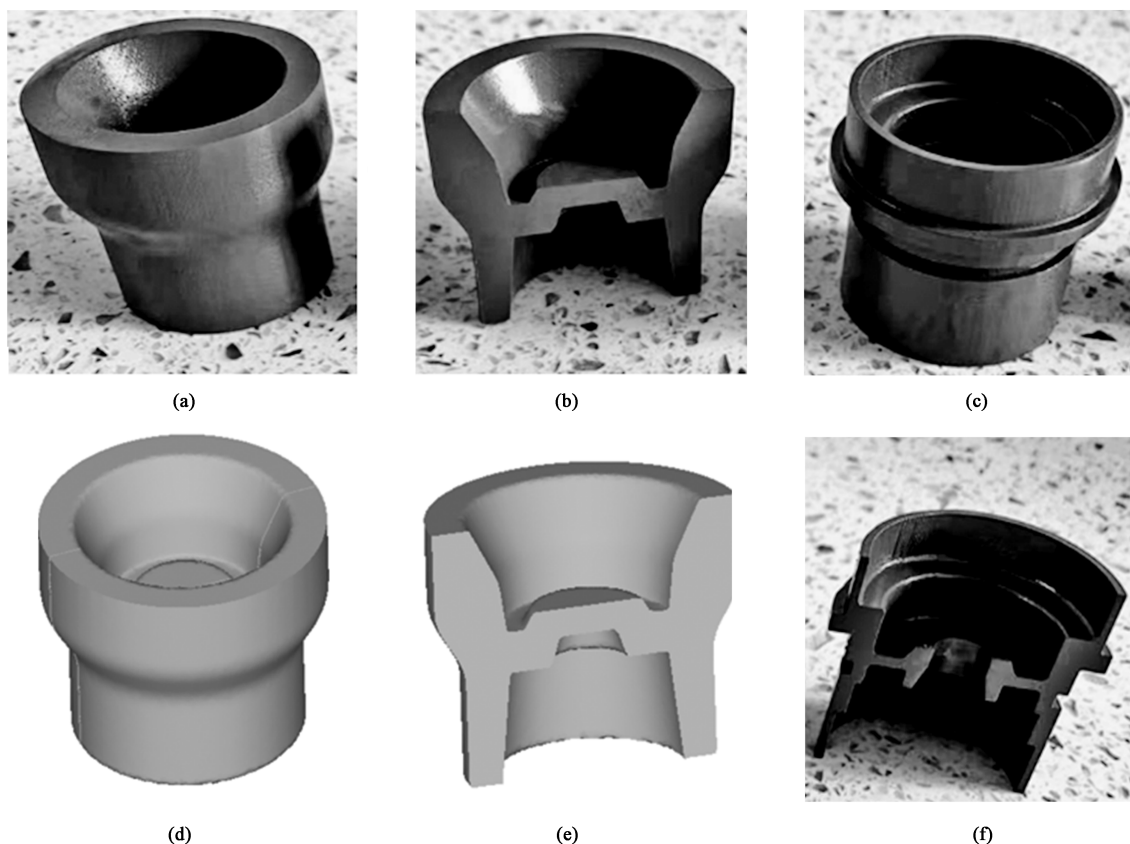


图 11 薄壁管件生产试验

(a) 预制坯零件 (b) 预制坯切开截面 (c) 薄壁管件 (d) 预制坯模拟件 (e) 预制坯模拟件切开截面  
(f) 薄壁管件切开截面

Fig. 11 Production test of thin-walled pipe

(a) Preformed billet part (b) Cut section of preformed billet (c) Thin-walled pipe (d) Simulated part of preformed billet  
(e) Cut section of simulated part for preformed billet (f) Cut section of thin-walled pipe

载荷和模具磨损等方面进行了综合分析，最终确定了预制坯 3、闭式挤压方案 3 为最佳方案。改进后工艺的材料利用率为 46.4%，与原工艺的 25.6% 相比，得到了显著提升。

#### 参考文献：

- [1] 骆静, 陈勇全, 姜耀碎, 等. 双联齿轮精密塑性成形研究与模具设计 [J]. 制造技术与机床, 2021, (12): 52-54.  
Luo J, Chen Y Q, Jiang Y C, et al. Mold design and research on precision plastic forming of duplicate gear [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021, (12): 52-54.
- [2] 张学奇, 董万鹏, 葛力华, 等. 基于正交试验的闭式挤压工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (3): 84-89.  
Zhang X Q, Dong W P, Ge L H, et al. Processing parameters optimization of closed extrusion based on orthogonal experiment [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (3): 84-89.
- [3] 王国强, 孙红艳, 翟旭军. 基于 ANSYS 的锥齿轮闭式模锻工艺的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (23): 97-99, 106.  
Wang G Q, Sun H Y, Zhai X J. Numerical simulation of closed die forging process for bevel gear shaft based on ANSYS [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (23): 97-99, 106.
- [4] 姜玖华, 刘中秋, 李宝宽. 7XXX 系铝合金棒材挤压工艺的有限元模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (11): 1337-1341.  
Jiang J H, Liu Z Q, Li B K. Finite element simulation of extrusion process of 7XXX series aluminum alloy bar [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42 (11): 1337-1341.
- [5] 陈金霞, 吕文春, 赵春来. 基于 Deform 的螺旋伞齿轮轴模锻工艺的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (1): 96-98.  
Chen J X, Lyu W C, Zhao C L. Numerical simulation of cross wedge rolling process for spiral bevel gear shaft based on deform [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (1): 96-98.
- [6] 张巍. 车用 2A12 铝合金连接锻件变形规律分析与工艺设计 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (1): 90-96.  
Zhang W. Deformation analysis and process design of 2A12 aluminum alloy connecting forgings for vehicles [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (1): 90-96.
- [7] 王耀, 顾小燕. 三通阀体多向模锻工艺研究及有限元分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 28-33.



- Wang Y, Gu X Y. Study on multi-directional die forging technology for tee valve body and finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 28-33.
- [8] 丛兵兵, 孔明, 张弘斌, 等. 马车螺栓冷锻成形有限元模拟及模具设计 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 76-81.
- Cong B B, Kong M, Zhang H B, et al. Finite element simulation and die design of cold heading forming for carriage bolt [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 76-81.
- [9] 胡建军. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- Hu J J. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Course [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [10] 刘建宇, 张留军, 张心金, 等. 井口头锻件用 AISI 4140 钢高温热压缩变形行为研究 [J]. 天津理工大学学报, 2021, 37 (2): 30-35.
- Liu J Y, Zhang L J, Zhang X J, et al. Flow behavior of AISI 4140 steel for well head forging during hot compression at elevated temperature [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2021, 37 (2): 30-35.
- [11] 屈晓晓, 张治民, 李国俊, 等. 基于 Archard 模型的铝合金盒形件热挤压模具磨损研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9): 153-157.
- Qu X X, Zhang Z M, Li G J, et al. Research on wear of hot extrusion die of aluminum alloy box parts based on Archard model [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (9): 153-157.
- [12] 王宝顺, 林奔, 张麦仓, 等. Hastelloy G3 管材热挤压模具磨损有限元分析 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 32 (9): 1209-1214.
- Wang B S, Lin B, Zhang M C, et al. Finite element analyses of die wear during hot extrusion of Hastelloy G3 tubes [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32 (9): 1209-1214.
- 
- (上接第 35 页)
- Cheng M W, Liu F L, Li W Q, et al. Study on microstructure evolution rule of multi-station upsetting for stainless steel high-lock nut [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (5): 103-107.
- [2] 肖志玲, 刘百宣, 孙红星, 等. 高强钢 20MnTiB 多工位冷锻变形行为 [J]. 材料工程, 2016, 44 (3): 77-83.
- Xiao Z L, Liu B X, Sun H X, et al. Multi-stage cold forging behavior of high strength steel 20MnTiB [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44 (3): 77-83.
- [3] 闫红艳, 郭永强, 王志科, 等. 6 寸法兰多工位闭式精锻工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 58-63, 71.
- Yan H Y, Guo Y Q, Wang Z K, et al. Multi-station closed precision forging process for six-inch flange [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 58-63, 71.
- [4] 陈凌翔, 李月超. 汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 75-82.
- Chen L X, Li Y C. Optimization and numerical simulation of cold forging process for automobile hexagonal ball head [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 75-82.
- [5] 林雅杰, 仲太生, 丁武学. 车用齿轮毛坯多工位精密热模锻工艺分析及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54 (3): 82-87.
- Lin Y J, Zhong T S, Ding W X. Process analysis and die design of multi-station precision hot die forging for automotive gear blank [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54 (3): 82-87.
- [6] 李天翔, 张利虎. 车用异形件浮动凹模冷锻工艺分析及模芯结构优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 62-67, 82.
- Li T X, Zhang L H. Cold upsetting process analysis and die core structure optimization on floating die for special-shaped parts of vehicle [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 62-67, 82.
- [7] 梁强. 活塞销冷锻挤成形微折叠缺陷分析及改进措施 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 99-104.
- Liang Q. Micro-folding defect analysis and improvement of cold upsetting-extruding process for piston-pin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 99-104.
- [8] 张东民, 刘铭心, 盛育东, 等. 薄壁六角螺母冷锻过程中模具磨损模拟分析及参数优化 [J]. 润滑与密封, 2017, 42 (10): 114-117.
- Zhang D M, Liu M X, Sheng Y D, et al. Process analysis and parameter optimization on die wear in cold heading for thin-walled hex nut [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42 (10): 114-117.
- [9] 赵志繁, 侯怀书, 钱瑞福, 等. 六角法兰面锁紧螺母冷锻挤成型数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
- Zhao Z F, Hou H S, Qian R F, et al. Numerical simulation and optimization of cold heading-extrusion of hexagon flange face locking nuts [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
- [10] 冯文杰, 杨创创, 陈莹莹, 等. 基于数值模拟的汽车差速器齿轮冷挤压工艺方案 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2018, 32 (4): 75-80.
- Feng W J, Yang C C, Chen Y Y, et al. Study on cold extrusion process of automobile differential gears based on numerical simulation [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2018, 32 (4): 75-80.
- [11] 胡建军, 李小平. Deform-3D 塑性成形 CAE 教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- Hu J J, Li X P. Deform-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [12] 董奇, 金飞翔, 秦强, 等. 基于正交试验齿圈座热锻成形工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (8): 18-22.
- Dong Q, Jin F X, Qin Q, et al. Optimization of hot forging forming process based on orthogonal test for gear ring seat [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (8): 18-22.