

管材成形

## 同轴式电动汽车带轴头桥壳的一体式成形工艺

王连东<sup>1</sup>, 张乾助<sup>1,2</sup>, 张淑静<sup>1</sup>, 宋希亮<sup>1,3</sup>, 王晓迪<sup>1,4</sup>

(1. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 长城汽车股份有限公司, 河北 保定 071000;  
3. 秦皇岛通桥科技有限公司, 河北 秦皇岛 066004; 4. 中信戴卡股份有限公司, 河北 秦皇岛 066011)

**摘要:** 针对同轴式电动汽车驱动桥, 设计了带轴头桥壳的一体式成形工艺, 首先选用无缝钢管进行胀压成形制得预成形管坯, 再对两端圆管部分进行冷态缩径、热态挤压成形轴头及与内侧连接的台肩。建立轴头挤压成形的力学模型, 分析金属的流动趋势, 揭示挤压量、镦粗区加热长度对轴头、台肩成形的影响规律, 并给出挤压量的近似计算公式。针对某轴荷 80 kN 的电动汽车桥壳, 通过有限元模拟和 1:1 工程试验, 揭示了挤压量  $s$ 、镦粗区加热长度  $L$  对台肩根部壁厚、内腔圆角半径的影响规律, 确定了  $s$  的合适范围为 36~39 mm、 $L$  的合适范围为 34~44 mm。研究表明: 设计的一体式成形工艺可行, 为生产实践提供了重要依据。  
**关键词:** 汽车桥壳; 半轴套管; 胀压成形; 挤压成形; 挤压量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.014

中图分类号: TG316 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0094-09

## Integral forming process on coaxial electric vehicles with axle head axle housing

Wang Liandong<sup>1</sup>, Zhang Qianzhu<sup>1,2</sup>, Zhang Shujing<sup>1</sup>, Song Xiliang<sup>1,3</sup>, Wang Xiaodi<sup>1,4</sup>

(1. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding 071000, China; 3. Tong Qiao Technology Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China;  
4. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, China)

**Abstract:** For the drive axle housing of coaxial electric vehicle, the integral forming process with axle head axle housing was designed. First, the seamless steel tube was firstly expanded and pressed to make a preformed tube blank, and then the circular tubes at both ends were cold-reduced, hot extruded to form shaft head and shoulder connected to the inner side. Furthermore, the mechanical model of shaft head extrusion forming was established, the flow trend of metal was analyzed, the influence laws of extrusion quantity and heating length of upsetting area on the formation of shaft head and shoulder were revealed, and the approximate calculation formula of extrusion quantity was given. For an axle housing of electric vehicle with axle load of 80 kN, the influence laws of extrusion quantity  $s$  and heating length  $L$  of upsetting area on the thickness of root for the shoulder and the fillet radius of the inner cavity were revealed by the finite element analysis and 1:1 engineering tests, and the suitable range of  $s$  and  $L$  was 36~39 mm and 34~44 mm, respectively. The results show that the designed integral forming process is feasible, and provides the important evidence for production practice

**Key words:** automobile axle housing; axle-shaft tube; bulging-pressing deforming; extrusion forming; extrusion quantity

汽车桥壳是汽车底盘上重要的承载件, 与从动桥一起支撑车架及其上各总成的重量, 在汽车行驶时承受由车轮传来的路面反作用力和力矩, 应具有较强的刚度和强度<sup>[1-2]</sup>。

汽车桥壳又是主减速器、差速器和驱动车轮传动装置的外壳<sup>[3]</sup>, 由桥壳本体及两端轴头 (即半轴套管) 组成。目前, 轴头主要通过模锻、镦挤或温

挤压制坯<sup>[4-5]</sup>, 机加工后进行调质处理, 然后再与桥壳本体焊为一体。由于轴头与桥壳本体所用的材料不同、热处理方式不同, 两者焊接时存在虚焊、焊不实等隐患, 在桥壳台架试验及实际应用中存在焊缝开裂现象, 严重影响了桥壳的使用性能<sup>[6-7]</sup>。

对于同轴式电动汽车驱动桥, 其电机、主减速器、差速器组成的动力系统安装在减速器壳体中, 减速器壳体左右两端分别装焊在桥壳左右半壳上<sup>[8]</sup>, 如图 1 所示。目前, 同轴式电动汽车驱动桥的半壳主要采用铸造方法制造, 重量大、制造成本高<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2022-06-04; 修订日期: 2022-09-10

基金项目: 河北省重大科技成果转化专项资助项目 (20282202Z)

作者简介: 王连东 (1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: wld670509@163.com

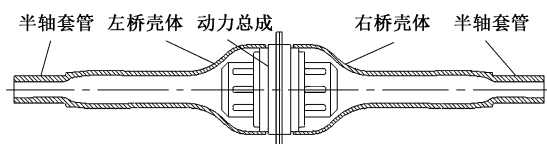


图 1 同轴式电动汽车驱动桥总成

Fig. 1 Driving axle assembly of coaxial electric vehicles

胀压成形是制造桥壳的新方法<sup>[10-11]</sup>，首先将无缝钢管经两端缩径、中部液压胀形后得到近似回转体状的预成形管坯，在管坯内部充入低压液体后，用模具从上下、前后方向进行整体压制成形，得到带有桥包的桥壳管件<sup>[12]</sup>，这样本体无焊缝，彻底消除了焊接带来的隐患。利用胀压成形方法制造的汽车桥壳的疲劳寿命达到 120 万次以上，大幅提高了产品的性能<sup>[13-14]</sup>，并且用于批量生产。

本文针对同轴式电动汽车驱动桥桥壳，设计了带轴头一体式成形工艺，首先选用无缝钢管进行胀压成形制得预成形管坯，再用挤压方法成形两端的轴头，彻底消除了轴头分体加工、焊接存在的焊缝开裂隐患，大幅减轻了产品重量。通过对带轴头桥壳整体成形的理论分析和有限元模拟，揭示了轴头挤压成形的金属流动，揭示了挤压量、墩粗区加热长度等工艺参数对成形的影响规律，并进行 1:1 工程试验，制得带轴头桥壳，为工程应用提供了重要参考。

## 1 轴头桥壳一体化成形工艺设计

### 1.1 结构设计

某同轴式电动车驱动桥桥壳为左右对称结构，图 2 为设计的半壳（左侧部分）。其中，半壳右端为外径为  $d_1$ 、壁厚为  $t_1$  的圆管 I，圆管 I 内侧为高度的  $h_1$ 、宽度为  $b_1$  的方臂区；方臂区的左边为一段阶梯管，内侧外径为  $d_2$ 、壁厚为  $t_2$ ，外侧外径为  $d_3$ 、壁厚为  $t_3$ ；最外端为轴头，其外径为  $d_4$ 、壁厚为  $t_4$ ；轴头与阶梯管之间通过台肩过渡，台肩根部的壁厚为  $t_b$ ，外圆角半径为  $R_c$ ，里侧内腔圆角半径为  $R_b$ ； $L_s$  为轴头长度， $L_p$  为半壳长度。

### 1.2 成形工艺设计

将图 2 所示的桥壳半壳左右两部分合在一起（中间考虑切割余量），首先选用无缝钢管进行胀压成形制得预成形管坯，再成形两端的阶梯管及轴头，成形后从中间切割同时得到左右半壳，具体成形工艺如下。

(1) 选择外径为  $d_0$ 、壁厚为  $t_0$  的 20Mn2 热轧无缝钢管，下料长度为  $L_0$ ，如图 3a 所示。

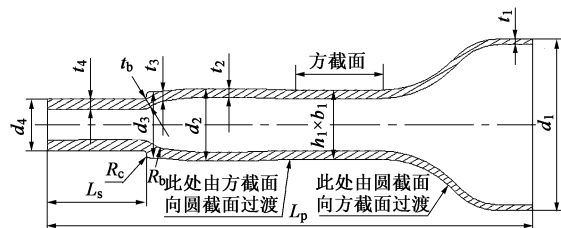


图 2 同轴式电动汽车桥壳结构

Fig. 2 Structure of axle housing for coaxial electric vehicles

(2) 对初始管坯两端进行缩径、中部进行液压胀形，退火后再对中部进行充液压制成形，得到长度为  $L_1$  的预成形管坯，如图 3b 所示。两端圆管的外径为  $d_2$ 、壁厚为  $t_2$ ，圆管内侧的高度为  $h_1$ 、宽度为  $b_1$  的方臂区、中部外径为  $d_1$ 、壁厚为  $t_1$  的圆管以及圆管与方臂区之间的锥形过渡区均已成形。

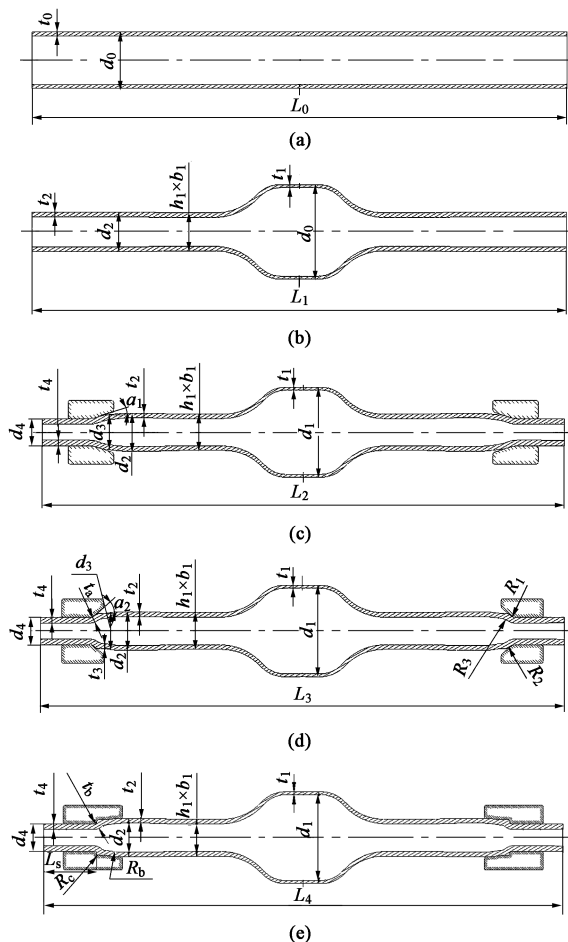


图 3 汽车桥壳轴头一体化成形工艺流程图

(a) 初始无缝钢管 (b) 预成形管坯 (c) 端部缩径后管坯  
(d) 第 1 次挤压后的管坯 (e) 第 2 次挤压后的管件

Fig. 3 Flow chart of integral forming process of shaft head for automobile axle housing

(a) Initial seamless steel tube (b) Preformed tube blank  
(c) Tube after diameter eduction at end (d) Tube blank after the first extrusion (e) Tube blank after the second extrusion

(3) 对预成形管坯两端采用半锥角为  $\alpha_1$  的锥形凹模进行推压缩径, 端部外径减至  $d_4$ , 壁厚增加至  $t_4$ , 端部内侧面外径达到  $d_3$ , 如图 3c 所示, 此时管坯长度为  $L_2$ 。

(4) 对缩径后的锥形部分及外径为  $d_3$  的圆管经中频加热至  $700 \sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 保证挤压成形时温度不低于  $650\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(5) 采用半锥角为  $\alpha_2$  的锥形凹模 ( $\alpha_2$  大于缩径凹模的半锥角  $\alpha_1$ ) 对管坯两侧的锥形部分进行第 1 次挤压, 成形后锥形部分的外表面与外侧和内侧的过渡圆角半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 内腔的圆角半径为  $R_3$ , 第 1 次挤压后的台肩根部的壁厚为  $t_a$ , 管坯长度为  $L_3$ , 如图 3d 所示。

(6) 采用半锥角为直角的凹模进行第 2 次挤压, 轴向挤压力为  $s$ , 成形轴头内侧的台肩, 台肩根部的壁厚为  $t_b$ , 外侧圆角半径为  $R_c$ , 内腔圆角半径为  $R_b$ , 管件长度为  $L_4$ , 如图 3e 所示。

2 轴头挤压成形分析

2.1 台肩挤压成形分析

台肩成形时的变形区包括第 1 次挤压后形成的锥形变形区 (即  $AA_1 \sim FF_1$  之间的金属) 及内侧圆管的镦粗区 (即  $FF_1 \sim GG_1$  之间的金属), 如图 4a 所示。在挤压过程中, 锥形变形区的金属沿径向流

动引起壁厚增加, 沿轴向向右流动形成台肩, 如图 4b 所示; 镦粗区右侧受到未变形金属的约束, 外侧受到模具型腔的限制, 金属沿径向向内流动发生增厚变形, 壁厚增加。锥形变形区的外端点  $A$  到镦粗区的  $G$  点之间的成形温度需达到  $650\text{ }^\circ\text{C}$  以上, 镦粗区的加热长度为  $L$ 。

台肩挤压变形时的轴向挤压力  $s$  和镦粗区加热长度  $L$  将影响台肩处的成形质量, 若  $s$  较小或  $L$  较大, 锥形变形区的金属流动量不足, 台肩高度不够, 台肩下方的壁厚比较小, 会影响该处的强度; 相反, 若  $s$  过大或  $L$  较小, 台肩高度大, 引起镦粗区的增厚变形过大, 台肩内腔处的圆角半径  $R_b$  变小,  $R_b$  过小将产生褶皱, 严重影响成形质量。

2.2 挤压力计算

假想在台肩挤压成形过程中, 半锥角为直角的凹模竖壁  $HH_1$  被推进到锥形变形区与镦粗区之间的过渡点  $F$  时, 台肩成形, 则挤压力  $s$  为曲线段  $AF$  在轴向中心线上的投影长度, 由线段  $AB$ 、线段  $BE$  在轴向中心线上的投影长度及线段  $EF$  组成。挤压力  $s$  的近似计算公式为:

$$s = \frac{d_3 - d_4}{2 \tan \alpha_2} + (R_1 + R_2) \left( \sin \alpha_2 - \frac{1 - \cos \alpha_2}{\tan \alpha_2} \right) \quad (1)$$

3 带轴头桥壳成形有限元模拟

3.1 研究对象

针对某轴荷  $80\text{ kN}$  的同轴式电动车驱动桥半壳, 主要参数为: 右端圆管 I 的外径  $d_1 = \Phi 299\text{ mm}$ 、壁厚  $t_1 = 9.5\text{ mm}$ ; 圆管 I 内侧方臂区的高度  $h_1 = 135\text{ mm}$ 、宽度  $b_1 = 120\text{ mm}$ ; 方臂区左侧的阶梯管的内侧面外径  $d_2 = \Phi 125\text{ mm}$ 、壁厚  $t_2 = 13\text{ mm}$ , 内侧面外径  $d_3 = \Phi 115\text{ mm}$ 、壁厚  $t_4 = 14\text{ mm}$ ; 端部轴头外径  $d_4 = \Phi 89\text{ mm}$ 、壁厚  $t_4 = 18\text{ mm}$ ; 台肩根部壁厚不小于  $16\text{ mm}$ , 里侧内腔圆角半径  $R_b$  不小于  $7\text{ mm}$ 。

3.2 预成形管坯胀压成形模拟

选择外径  $d_0$  为  $\Phi 178\text{ mm}$ 、壁厚  $t_0$  为  $12\text{ mm}$ 、下料长度为  $1690\text{ mm}$  的 20Mn2 热轧无缝钢管作为初始管。通过拉伸试验, 得到 20Mn2 钢管的材料性能参数如表 1 所示。

表 1 20Mn2 钢管的材料性能参数

Table 1 Material property parameters of 20Mn2 steel tube					
参数	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	伸长率 $A/\%$
数值	$2.1 \times 10^5$	0.3	365	647	25

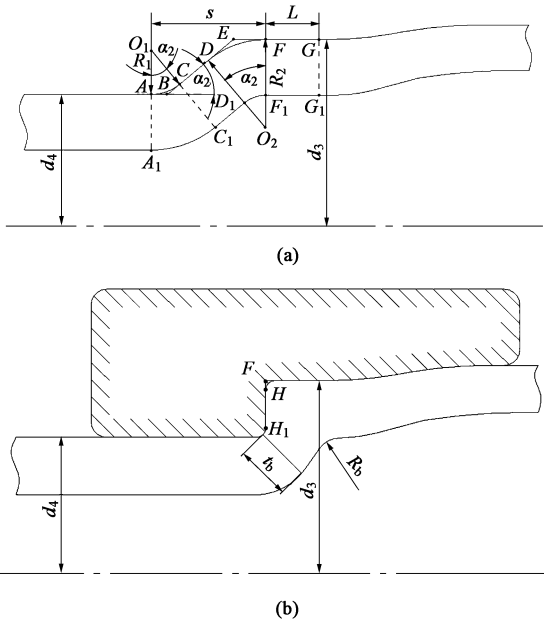


图 4 挤压变形示意图

(a) 挤压前 (b) 挤压后

Fig. 4 Schematic diagrams of extrusion deformation

(a) Before extrusion (b) After extrusion

塑性阶段的真实应力-真实应变曲线如图 5 所示, 关系为:

$$\sigma = 980\varepsilon^{0.2} \tag{2}$$

式中:  $\sigma$  为真实应力;  $\varepsilon$  为真实应变。

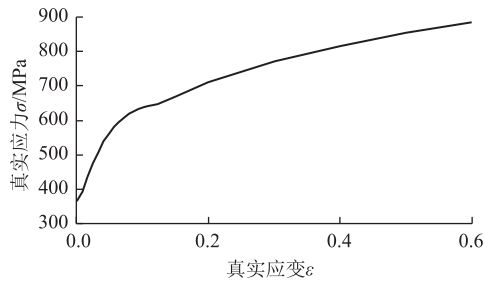


图 5 20Mn2 钢管的真实应力-真实应变曲线  
Fig. 5 True stress-true strain curve of 20Mn2 steel tube

对初始管两端进行两次等长度自由缩径, 再对其中部进行两次胀形, 得到近似回转体的预成形管坯, 其中部外径  $d_1 = \Phi 299.21$  mm。最后, 对预成形管坯压制成形, 将圆管 I 内侧圆管压制高度  $h_1 = 135.16$  mm、宽度  $b_1 = 119.43$  mm 的方臂。压制成形管坯如图 6 所示。

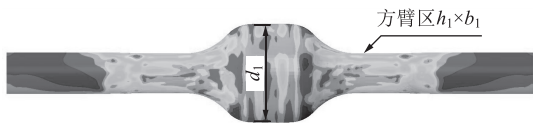


图 6 压制成形管坯  
Fig. 6 Pressed tube blank

3.3 轴头成形模拟

3.3.1 端部缩径模拟

采用凹模半锥角均为  $20^\circ$ , 内径分别为  $\Phi 116.7$ 、 $\Phi 102.0$ 、 $\Phi 95.0$  和  $\Phi 89.5$  mm 的缩径模具对管坯端部进行 4 道次自由缩径, 缩径后的管坯如图 7 所示。分别测量 4 道次端部缩径的端部壁厚  $t_4$ 、外径  $d_4$  以及位于方臂区阶梯管外侧的外径  $d_3$ , 结果见表 2。



图 7 4 道次端部缩径后的管坯  
Fig. 7 Tube blank after four-pass diameter reducing at end

3.3.2 第 1 次挤压成形模拟

由于左右桥壳属对称结构, 只对左壳体进行挤压模拟, 挤压过程中对图 4a 中  $AA_1 \sim GG_1$  区域进行加热, 考虑到加热后的温度扩散, 在模拟过程中

表 2 端部缩径测量结果 (mm)

Table 2 Measurement results of diameter reducing at end (mm)

缩径道次	端部外径 $d_4$	端部壁厚 $t_4$	阶梯管外侧外径 $d_3$
第 1 道次	$\Phi 115.20$	16.63	$\Phi 115.20$
第 2 道次	$\Phi 100.85$	18.20	$\Phi 115.27$
第 3 道次	$\Phi 94.38$	18.52	$\Phi 115.32$
第 4 道次	$\Phi 89.08$	18.78	$\Phi 115.38$

将管坯分块赋予相应温度下的材料属性,  $L = 34$  mm 时管坯的分块情况如图 8 所示, 各温度下材料塑性的真实应力-真实应变曲线如图 9 所示。模拟时需将管坯划分网格, 整个管坯壁厚被划分为 9 层,  $AA_1 \sim GG_1$  变形区域网格的轴向尺寸设为 2 mm,  $AA_1 \sim GG_1$  区域两侧设置长度为 24 mm 的过渡区域, 该区域网格的轴向尺寸设为 4 mm, 其余变形较小的区域的网格轴向尺寸设为 8 mm。

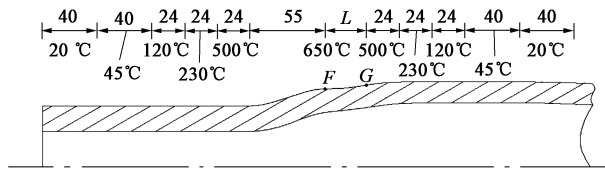


图 8 模拟时温度区间设置  
Fig. 8 Setting of temperature ranges in simulation

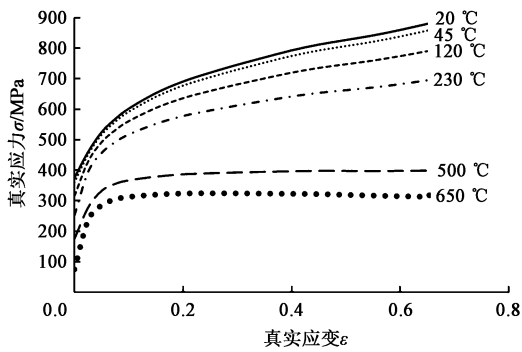


图 9 20Mn2 钢管在不同温度下的真实应力-真实应变曲线  
Fig. 9 True stress-true strain curves of 20Mn2 steel tube at different temperatures

(1) 第 1 次挤压成形方案设计

给定镦粗区的加热长度  $L = 34$  mm, 第 1 次挤压时采用的凹模半锥角  $\alpha_2$  分别取  $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $65^\circ$ , 采用过渡圆角半径  $R_1 = 20$  mm 的挤压模具进行挤压。

(2) 第 1 次挤压成形模拟结果

第 1 次挤压成形的凹模半锥角  $\alpha_2 = 50^\circ$  时的模拟结果如图 10 所示, 主要参数为: 端部壁厚  $t_4 = 18.78$  mm、



外径  $d_4 = \Phi 89.08$  mm, 过渡圆角半径分别为  $R_1 = 20.08$  mm、 $R_2 = 34.36$  mm。采用不同凹模半锥角时的第 1 次挤压成形的台肩成形结果见表 3, 绘制成曲线, 分别如图 11 和图 12 所示。



图 10 第 1 次挤压成形后的管坯  
Fig. 10 Tube blank after the first extrusion forming

表 3 不同凹模半锥角时第 1 次挤压成形的台肩的主要参数 (mm)

Table 3 Main parameters of shoulder at different half cone angles of die in the first extrusion forming (mm)						
凹模半锥角 $\alpha_2/(^\circ)$	40	45	50	55	60	65
台肩根部壁厚 $t_b$	18.76	18.85	19.15	19.1	19.05	19.03
内腔圆角半径 $R_b$	36.52	32.01	30.26	28.43	27.19	26.38

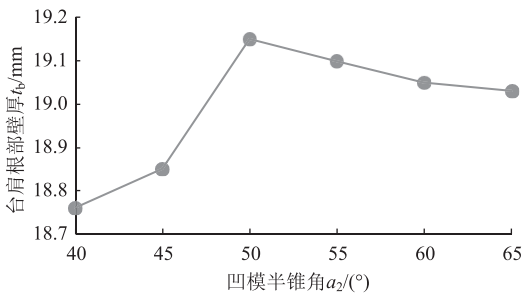


图 11 第 1 次挤压成形时台肩根部壁厚随凹模半锥角的变化  
Fig. 11 Variation of wall thickness at root of shoulder with half cone angle of die in the first extrusion forming

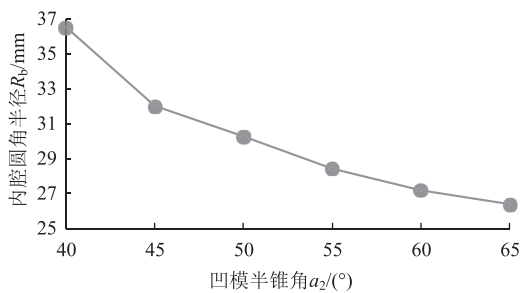


图 12 第 1 次挤压成形时内腔圆角半径随凹模半锥角的变化  
Fig. 12 Variation for fillet radius of inner cavity with half cone angle of die in the first extrusion forming

由台肩处参数的测量结果可知:

- 1) 第 1 次挤压成形时台肩根部壁厚随凹模半锥角  $\alpha_2$  的增加呈先增大再减小的趋势, 在  $\alpha_2 = 50^\circ$  时得到最大值, 为 19.15 mm;
- 2) 第 1 次挤压成形时内腔圆角半径随凹模半

锥角  $\alpha_2$  的增加一直减小;

3) 综合台肩根部壁厚以及内腔圆角半径的大小, 确定第 1 次挤压成形时的凹模半锥角的取值范围为  $50^\circ \sim 55^\circ$ 。

3.3.3 第 2 次挤压成形模拟

由第 1 次挤压成形模拟结果可知  $R_1 = 20.08$  mm,  $R_2 = 34.36$  mm,  $\alpha_2 = 50^\circ$ ,  $d_3 = \Phi 115.38$  mm,  $d_4 = \Phi 89.08$  mm, 代入式 (1) 可得计算挤压量  $s_0 = 36.42$  mm。

(1) 第 2 次挤压成形方案设计

方案 I: 给定镦粗区的加热长度  $L = 34$  mm, 挤压量  $s$  分别取 32、34、36、38 和 40 mm (与计算挤压量  $s_0$  的比值分别为 0.88、0.93、0.99、1.04 和 1.10), 进行成形模拟, 分析管件的成形情况以及挤压量对台肩成形的影响, 确定合适的挤压量。

方案 II: 根据方案 I 确定的挤压量  $s$ , 镦粗区加热长度  $L$  分别取 14、24、34、44、54 和 64 mm (与镦粗区外径的比值分别为 0.12、0.21、0.30、0.38、0.47 和 0.56), 进行成形模拟, 分析加热长度对台肩成形的影响, 确定合适值。

(2) 方案 I 成形模拟结果

挤压量为 36 mm 时, 第 2 次挤压成形情况如图 13 所示, 台肩根部壁厚  $t_b = 18.29$  mm, 外圆角半径  $R_e = 12.20$  mm, 内腔圆角半径  $R_b = 24.20$  mm。不同挤压量时台肩的第 2 次挤压成形结果见表 4, 绘制成曲线, 如图 14 和图 15 所示。

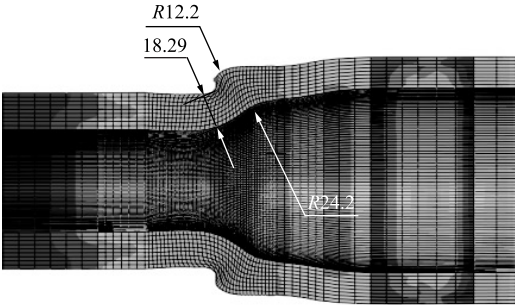


图 13 挤压量为 36 mm 时第 2 次挤压成形的管坯  
Fig. 13 Tube blank in the second extrusion forming at extrusion quantity of 36 mm

表 4 不同挤压量时第 2 次挤压成形中台肩的主要参数 (mm)  
Table 4 Main parameters of shoulder at different extrusion amounts in the second extrusion forming (mm)

挤压量 $s$	32	34	36	38	40
台肩根部壁厚 $t_b$	17.54	17.67	18.29	18.46	18.83
内腔圆角半径 $R_b$	28.21	26.94	24.2	15.42	8.61
外侧圆角半径 $R_e$	34.01	33.1	12.19	8.28	5.02

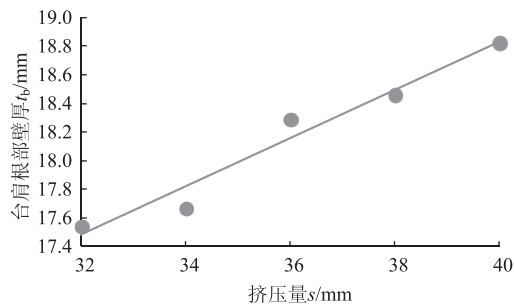


图 14 第 2 次挤压成形中台肩根部壁厚随挤压量的变化  
Fig. 14 Variation for wall thickness at root of shoulder with extrusion quantity in the second extrusion forming

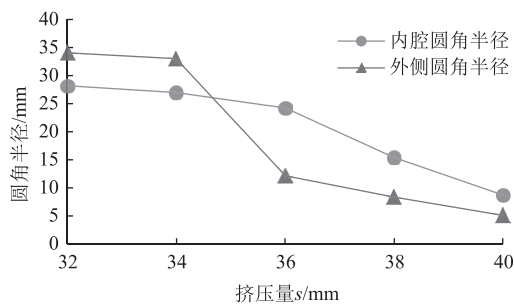


图 15 第 2 次挤压成形中台肩内腔和外端圆角半径随挤压量的变化

Fig. 15 Variation of fillet radius for inner cavity and outer corner of shoulder with extrusion quantity in the second extrusion forming

由第 2 次挤压成形中台肩处参数的测量结果可知：

1) 台肩根部壁厚随挤压量  $s$  的增加近似呈线性增加，而内腔圆角半径  $R_b$  近似呈线性减小。当挤压量  $s$  由 32 mm 增加至 40 mm 时，台肩根部壁厚  $t_b$  由 17.54 mm 增加至 18.83 mm，而内腔圆角半径  $R_b$  由 28.21 mm 减小至 8.61 mm；

2) 随挤压量  $s$  的增加，台肩外部成形逐渐饱满，圆角半径由 34.01 mm 逐渐减小至 5.02 mm；

3) 当挤压量为 32 mm 时，台肩根部壁厚为 17.54 mm，外圆角较大，台肩处并未成形直角台肩；

4) 综合台肩根部壁厚以及外侧和内腔圆角半径的大小，确定挤压量  $s$  的合适范围为 36~39 mm，与计算挤压量的比值范围为 0.99~1.07。

### (3) 方案 II 成形模拟结果

设定挤压量  $s=36$  mm，镦粗区的加热长度  $L$  分别为 14、24、34、44、54 和 64 mm，进行成形模拟。测量台肩根部壁厚及内腔圆角半径大小，结果见表 5，绘制成曲线，如图 16 和图 17 所示。

由模拟结果可知：

1) 镦粗区加热长度  $L$  由 14 mm 增加至 34 mm

表 5 第 2 次挤压成形中不同镦粗区加热长度下台肩的主要参数 (mm)

Table 5 Main parameters for shoulder at different heating lengths of upsetting area in the second extrusion forming (mm)

镦粗区加热长度 $L$	14	24	34	44	54	64
台肩根部壁厚 $t_b$	17.13	18.35	18.29	17.72	17.35	17.31
内腔圆角半径 $R_b$	4.10	16.49	24.20	24.70	23.90	23.70

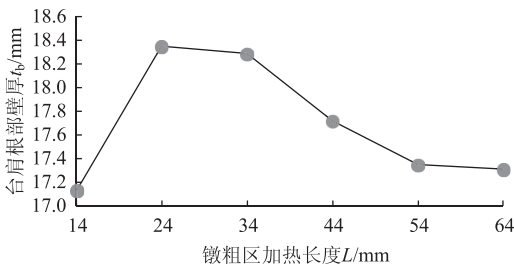


图 16 第 2 次挤压成形中台肩根部壁厚  $t_b$  随镦粗区加热长度  $L$  的变化

Fig. 16 Variation of wall thickness  $t_b$  at root of shoulder with heating length  $L$  of upsetting area in the second extrusion forming

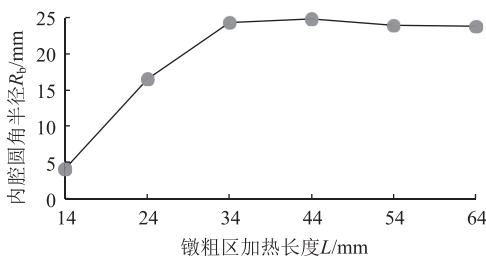


图 17 第 2 次挤压成形中台肩内腔圆角半径  $R_b$  随镦粗区加热长度  $L$  的变化

Fig. 17 Variation for fillet radius  $R_b$  of inner cavity for shoulder with heating length  $L$  of upsetting area in the second extrusion forming

时，台肩根部壁厚  $t_b$  由 17.13 mm 快速增至 18.35 mm 后略减小至 18.29 mm，而内腔圆角半径由 4.10 mm 快速增至 24.20 mm；

2) 镦粗区加热长度  $L$  由 34 mm 增加至 54 mm 时，台肩根部壁厚  $t_b$  由 18.29 mm 线性减小至 17.35 mm，而内腔圆角半径变化很小。圆管加热区长度  $L$  超过 54 mm 时，台肩的成形基本不再变化；

3) 综合台肩根部壁厚以及内腔圆角半径的大小，确定镦粗区加热长度  $L=34\sim44$  mm，即与镦粗区外径的比值范围为 0.30~0.38。

## 4 带轴头桥壳工程试验

针对某轴荷 80 kN 的同轴式电动车驱动桥半壳，按设计的工艺进行工程试验。选用外径  $d_0$  为

$\Phi 178$  mm、壁厚  $t_0$  为 12 mm 的 20Mn2 合金无缝钢管作为初始管, 下料长度为 1690 mm, 质量为 83.5 kg。

#### 4.1 预成形制坯

将图 18 所示的初试管坯经过缩径、液压胀形、压制成形得到预成形管坯, 如图 19 所示。

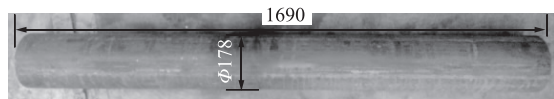


图 18 初始管坯

Fig. 18 Initial tube blank

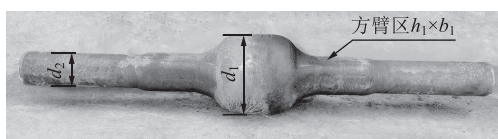


图 19 压制成形后的预成形管坯

Fig. 19 Preformed tube blank after pressing

压制工序后, 制件的中部圆管 I 的外径  $d_1 = \Phi 299.4$  mm; 方臂区的高度  $h_1 = 134.85$  mm、宽度  $b_1 = 120.23$  mm; 方臂区外侧圆管的外径  $d_2 = \Phi 125.11$  mm。

#### 4.2 轴头缩径试验

针对预成形管坯的两端圆管部分, 在三向液压机上采用锥形凹模 (半锥角为  $20^\circ$ ), 如图 20 所示, 进行 4 道次缩径, 外径减至  $\Phi 89.1$  mm (略小于第 4 次缩径的凹模内径  $\Phi 89.5$  mm), 壁厚增至 18.6 mm, 如图 21 所示。端部缩径时, 单道次变形量过大将引起管坯中部已成形部分产生新的变形。

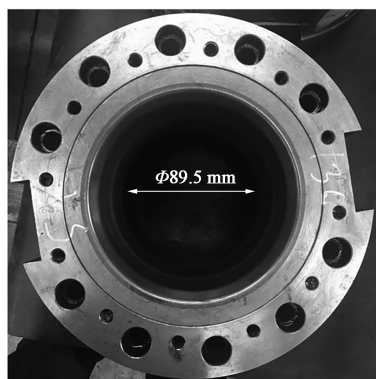


图 20 第 4 道次缩径凹模

Fig. 20 Die of diameter reducing in the fourth pass

#### 4.3 轴肩热挤压成形试验

在两端轴头缩径后的锥形区及内侧圆管即图 4a 中  $AA_1 \sim GG_1$  区域, 将加热的管坯转移至挤压模具过程中会有热量损失, 为保证挤压时管坯达到  $650^\circ\text{C}$ , 加热至  $750 \sim 800^\circ\text{C}$ 。



图 21 端缩后的轴头部分

Fig. 21 Shaft heads after end reducing

第 1 次挤压成形中凹模半锥角为  $50^\circ$ , 如图 22 所示, 第 2 次挤压成形中凹模半锥角为  $90^\circ$ 。第 2 次挤压成形采用 3.3.3 节中的方案 I 和方案 II 进行试验。

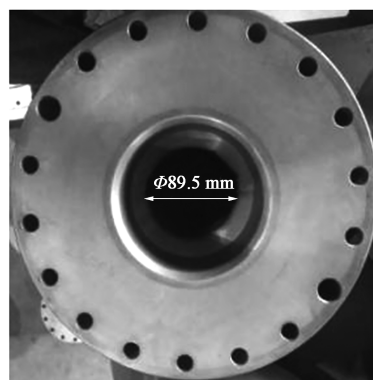


图 22 第 1 次挤压成形中半锥角为  $50^\circ$  的凹模

Fig. 22 Die with half cone angle of  $50^\circ$  in the first extrusion forming

##### (1) 方案 I 试验

锻粗区的加热长度  $L$  给定为 34 mm, 挤压量  $s$  分别取 34、36、38 和 40 mm, 得到的桥壳样件的外形良好, 台肩轮廓清晰, 其中挤压量为 36 mm 的桥壳管件见图 23。将桥壳制件按产品尺寸要求进行定长、剖切为左右半壳, 精加工后测量得到左右半壳的总质量为 75.08 kg, 由此计算得到材料利用率为 89.92%, 左右半壳总质量相对于铸造桥壳可减轻 12%~15%。

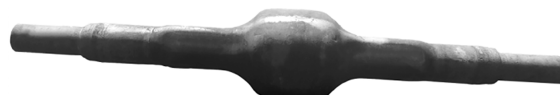


图 23 带轴头的一体式桥壳管件

Fig. 23 Integral axle housing pipe fittings with shaft heads

剖切挤压成形后的桥壳样件轴头如图 24 所示, 测量台肩根部的壁厚、内腔圆角半径大小, 见表 6。

由样件台肩的测量结果可知:

1) 随着挤压量  $s$  的增加, 台肩根部壁厚  $t_b$  增

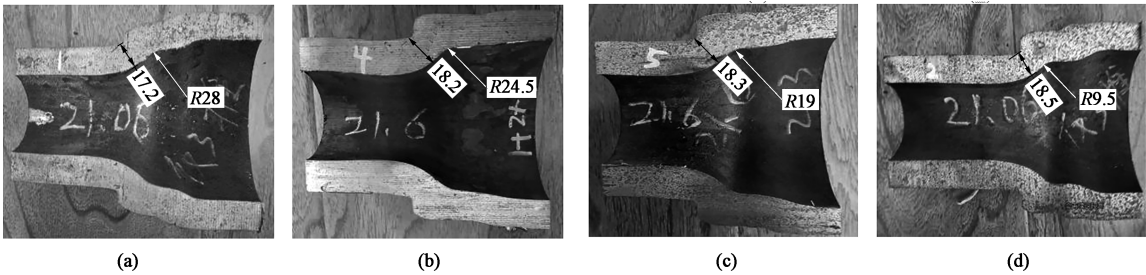


图 24 不同挤压量下的桥壳剖切件  
(a)  $s=34\text{ mm}$  (b)  $s=36\text{ mm}$  (c)  $s=38\text{ mm}$  (d)  $s=40\text{ mm}$   
Fig. 24 Cutting parts of axle housing at different extrusion quantities

表 6 不同挤压量下的样件台肩参数 (mm)  
Table 6 Parameters of shoulder for workpieces at different extrusion quantities (mm)

挤压量 $s$		34	36	38	40
台肩根部	试验	17.24	18.22	18.36	18.52
壁厚 $t_b$	模拟	17.67	18.29	18.46	18.83
内腔圆角	试验	28.00	24.50	19.00	9.50
半径 $R_b$	模拟	26.92	24.21	15.44	8.61

大，内腔圆角半径  $R_b$  逐渐减小，变化趋势与模拟结果相同；

2) 试验结果与模拟值基本一致，最大误差在挤压量  $s$  为 38 mm 时：内腔圆角半径试验值为 19 mm，

较模拟值 (15.44 mm) 大 3.56 mm。主要原因为：试验中的圆管区加热长度大于设定的 34 mm，锥形区挤压时金属沿轴向流动较多，圆管区增厚变形较模拟值大。

(2) 方案 II 试验

挤压量  $s$  设定为 36 mm，镦粗区加热长度  $L$  分别为 24、34、44 和 54 mm，样件成形性良好。剖切不同加热长度下的样件轴头，如图 25 所示，测量台肩根部壁厚和内腔圆角半径的大小，如表 7 所示。

由表 7 的台肩测量结果可知：

1) 随着镦粗区加热长度  $L$  的增加，台肩根部壁厚  $t_b$  减小，内腔圆角半径  $R_b$  逐渐增大，变化趋势与模拟结果相同；

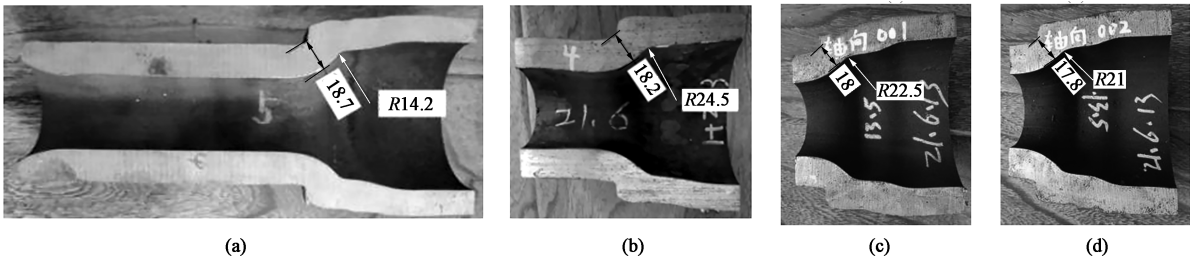


图 25 不同镦粗区加热长度下的桥壳剖切件  
(a)  $L=24\text{ mm}$  (b)  $L=34\text{ mm}$  (c)  $L=44\text{ mm}$  (d)  $L=54\text{ mm}$   
Fig. 25 Cutting parts of axle housing at different heating lengths of upsetting area

表 7 不同镦粗区加热长度下样件的台肩参数 (mm)  
Table 7 Parameters of shoulder for workpieces at different heating length of upsetting area (mm)

镦粗区加热长度 $L$		24	34	44	54
台肩根部	试验	18.71	18.23	18.01	17.82
壁厚 $t_b$	模拟	18.35	18.29	17.72	17.35
内腔圆角	试验	14.20	24.51	22.53	21.01
半径 $R_b$	模拟	16.49	24.21	24.70	23.91

2) 试验结果与模拟值基本一致，最大误差在  $L$  为 24 mm 时：内腔圆角半径试验值为 14.2 mm，较模拟值 (16.49 mm) 小 2.29 mm。主要原因为：试验中镦粗区的加热温度低于模拟值，锥形变形区挤压时金属沿轴向流动较少。

5 结论

(1) 设计了带轴头同轴式电动汽车桥壳的一体



式成形工艺,彻底消除了轴头分体加工、焊接存在的焊缝开裂隐患;建立了轴头挤压成形的力学模型,揭示了金属的流动规律,给出了挤压量的近似计算公式。

(2) 针对某轴荷为 80 kN 的电动汽车桥壳,采用有限元模拟了预成形管坯的胀压成形以及端部轴头的挤压成形,揭示了挤压量、镦粗区加热长度对台肩根部壁厚、内腔圆角半径的影响规律,确定了挤压量  $s$  的合适范围为 36~39 mm (与计算挤压量的比值范围为 0.99~1.07)、镦粗区加热长度  $L$  的合适范围为 34~44 mm (与镦粗区外径的比值范围为 0.30~0.38)。

(3) 进行了某轴荷为 80 kN 的电动汽车带轴头桥壳的 1:1 工程试验,验证了设计工艺的可行性;实测了不同挤压量和镦粗区加热长度条件下桥壳样件的台肩根部壁厚和内腔圆角半径大小。结果表明:试验结果与模拟值基本一致,分析了试验误差产生的原因,为生产实践提供了重要依据。

#### 参考文献:

- [1] 张兰生,李杨,徐超,等. 基于 ANSYS Workbench 的驱动桥壳动力学特性仿真与分析 [J]. 工具技术, 2021, 55 (11): 64-68.  
Zhang L S, Li Y, Xu C, et al. Simulation and analysis of dynamic characteristics of drive axle housing based on ANSYS Workbench [J]. Tool Engineering, 2021, 55 (11): 64-68.
- [2] 丁文敏. 汽车驱动桥壳性能仿真分析及其改进 [J]. 机械设计与制造, 2019, (9): 269-272.  
Ding W M. Performance simulation analysis and optimization of a truck drive axle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, (9): 269-272.
- [3] 熊锋,周智超,蒋昭杰,等. 基于多学科性能分析的驱动桥壳多目标优化 [J]. 汽车零部件, 2021, (6): 1-8.  
Xiong F, Zhou Z C, Jiang Z J, et al. Multi-objective optimization of vehicle drive axle housing based on multi-disciplinary performance analysis [J]. Automobile Parts, 2021, (6): 1-8.
- [4] 吕阳峰,宋国品,张屹,等. 半轴套管的加工 [J]. 金属加工: 冷加工, 2021, (12): 22-25.  
Lyu Y F, Song G P, Zhang Y, et al. Production of half axle shaft tubes [J]. MW Metal Cutting, 2021, (12): 22-25.
- [5] 李攀,罗建国,朱鑫锴,等. 重型载重车半轴套管精确挤压成形过程参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7): 79-85.  
Li P, Luo J G, Zhu X K, et al. Parameters optimization of precise extrusion forming process for half axle shaft tubes of heavy trucks [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 79-85.
- [6] 蔡锡斌,周林,潘祖岚. 汽车桥壳冲压工艺及模具设计 [J]. 模具工业, 2021, 47 (4): 35-39.  
Cai X B, Zhou L, Pan Z L. Design of stamping process and die for automobile axle housing [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (4): 35-39.
- [7] 董志涛. 液压胀形汽车桥壳的试验研究与有限元模拟 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007.  
Dong Z T. Test Research and Finite Element Method Simulation for Hydro-bulging Driving Axle [D]. Qinghuangdao: YanShan University, 2007.
- [8] 周友兵,黄苏刚. 电驱动桥耐久试验方法分析 [J]. 汽车工艺师, 2021, (11): 51-52, 55.  
Zhou Y B, Huang S G. Analysis of durability test method for electric drive axle [J]. Modern Components, 2021, (11): 51-52, 55.
- [9] 李世星,周大庆. 整体式铸钢桥壳铸造工艺优化 [J]. 铸造设备与工艺, 2021, (4): 19-22.  
Li S X, Zhou D Q. Casting process optimization of cast steel axle housing [J]. Foundry Equipment and Technology, 2021, (4): 19-22.
- [10] 吴娜,刘超,王晓迪. 小型汽车桥壳液压胀形加工方法的研究现状 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 12-19.  
Wu N, Liu C, Wang X D. Research status on hydro-bulging processing method of small automobile axle-housing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 12-19.
- [11] Wang X D, Wang L D, Jin M, et al. Mechanism analysis and engineering experiment of multi-directional pressing-forming pcomplex large-size automobile axle housing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120 (1-2): 1295-1314.
- [12] Liu H, Wang L D, Wang X D, et al. Analysis and control of cracking and wrinkling at the end of seamless steel tube with multi-pass large deformation diameter-reducing [J]. Metals, 2021, 11 (9): 1438-1438.
- [13] 崔亚平,王连东,高鹏飞. 液压胀形汽车桥壳强度分析 [J]. 汽车工程, 2006, (7): 692-695.  
Cui Y P, Wang L D, Gao P F. Strength analysis on hydro-bulged automotive rear axle housing [J]. Automotive Engineering, 2006, (7): 692-695.
- [14] 王连东,丁明慧,肖超. 胀压成形汽车桥壳性能的有限元模拟与试验 [J]. 汽车工程, 2016, 38 (1): 127-132.  
Wang L D, Ding M H, Xiao C. The finite element simulation and test on the performance of bulging-pressing formed vehicle axle housing [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (1): 127-132.