

锻造

基于 CAE 的汽车铝合金控制臂锻造成形工艺

周礼菊¹, 孙如梦¹, 高振伟², 司大强², 王雷刚¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏兴锻智能装备科技有限公司, 江苏 溧阳 213300)

摘要: 以某汽车右上控制臂为研究对象, 选用 6082 铝合金为锻造材料, 分析了产品的结构特点及成形难点, 确定了其成形工艺为两道次辊锻、两工位弯曲、预锻和终锻。根据锻模设计理论, 采用 Solidworks 软件设计各道次模具, 并通过 Deform 软件对 6082 铝合金控制臂成形过程进行模拟, 从温度分布、等效应力应变以及金属流动等角度分析了各工序的成形情况。针对成形方案中变形程度最大的预锻工序, 采用控制单一变量的方法, 分析了坯料始锻温度及摩擦因数对预锻成形的影响。结果表明: 预锻时, 随着始锻温度的增加, 平均等效应力减小, 始锻温度在 450~490 °C 时更合理; 改善润滑, 减小摩擦因数使得模具载荷降低, 锻件的最大等效应变减小, 有利于成形且提升模具寿命。最后, 基于模拟结果结合实际生产进行了试验, 得到了与模拟结果相吻合的成形锻件。

关键词: 6082 铝合金; 控制臂; 模具设计; 辊锻; 弯曲; 预锻; 终锻

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.001

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0001-07

Forging process on automotive aluminum alloy control arm based on CAE

Zhou Liju¹, Sun Rumeng¹, Gao Zhenwei², Si Daqiang², Wang Leigang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Xingduan Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Liyang 213300, China)

Abstract: For the upper right control arm of an automobile, taking 6082 aluminum alloy as the forging material, the structural characteristics and forming difficulties of product were analyzed, and its forming process was determined to be two-pass roll forging, two-station bending, pre-forging and final forging. Then, according to the design theory of forging die, each pass die was designed by software Solidworks, the forming process of 6082 aluminum alloy control arm was simulated by software Deform, and the forming situation of each process was analyzed from the perspective of temperature distribution, stress-strain and metal flow. Furthermore, for the pre-forging process with the largest deformation degree in the forming scheme, the influences of billet temperature and friction factor on the pre-forging forming were analyzed by controlling a single variable. The results show that during pre-forging, with the increasing of initial forging temperature, the average equivalent stress decreases, and the initial forging temperature is more reasonable at 450–490 °C. Moreover, improved lubrication and reduced friction factors can reduce the die load and the maximum equivalent strain of forgings, and prolong the service life of die. Finally, based on the simulation results and combined with the actual production, the experiment shows that the formed forgings obtained is consistent with the simulation results.

Key words: 6082 aluminum alloy; control arm; die design; roll forging; bending; pre-forging; final forging

控制臂是汽车底盘系统中最重要的零件之一, 在悬架中起传力、导向及支撑作用, 其综合力学性能对汽车行驶时的操作性和平稳性有很大影响^[1-2]。随着轻量化技术的发展, 控制臂构件由轻质材料铝、镁等代替钢的研究和生产逐渐增多, 成形方式也更

多元化^[3-4]。相较于其他工艺, 锻造成形得到的成品性能更优。本文以某汽车铝合金右上控制臂锻件为研究对象, 结合成形工艺理论以及计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 制定了两道次辊锻、两工位弯曲、预锻、终锻的成形工艺路线, 并使用 Solidworks 软件设计了各工序相应的模具。通过有限元分析软件 Deform, 在一定的工艺参数下对控制臂锻造成形过程进行了模拟, 通过分析模拟结果验证了成形工艺及模具设计的合理性。此外, 在上述研究的基础上, 选取预锻工序, 采用单因素法, 研究坯料始锻温度及摩擦因数对锻件成形

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775249)

作者简介: 周礼菊 (1999-), 女, 硕士研究生

E-mail: ljzhou9907@163.com

通信作者: 王雷刚 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: lgwang@mail.ujs.edu.cn

的影响规律,为 6082 铝合金控制臂模锻成形工艺参数的选择提供参考。最后,结合实际生产进行了试验验证。

1 控制臂锻造工艺方案设计

1.1 控制臂工艺分析

铝合金控制臂锻件如图 1 所示,其整体呈 U 形。除呈近圆柱状的两端外,锻件垂直于弯曲轴线方向呈工字型断面,上下不对称,中间腹板厚度小,两臂边缘的筋条局部结构复杂。锻件材料为 6082 铝合金,作为典型的 6000 系铝合金,因其比强度高、热塑性成形能力优异及耐腐蚀性强等优良的综合性能而被广泛应用于汽车结构件中^[5-6]。通过分析锻件结构,可知其成形存在如下难点:(1)沿弯曲轴线锻件截面面积变化十分剧烈,需要合理分配材料体积;(2)锻件两端、中间及大臂边连接法兰处截面面积较大,容易出现填充不满缺陷;(3)成形工字断面过程中,容易出现折叠缺陷。因此,本文研究的控制臂采用如下成形方案:下料—加热—制坯—预锻—终锻—切边,其中制坯工序包括辊锻和弯曲。



图 1 控制臂锻件模型

Fig. 1 Model of control arm forgings

1.2 有限元模型建立

通过三维造型软件 Solidworks 完成各工序坯料和模具建模后,将其导出为 STL 格式并导入 Deform 中。根据生产经验设置各工序参数,如表 1 所示。为了更好地贴合实际生产时的变形情况,模拟时以上一道工序结束时的坯料形状作为下一道工序的开始。辊锻和弯曲工序的坯料变形较小,为了提高模拟效率,划分网格数量为 60000,对坯料进行体积补偿。预锻成形过程比较复杂,将网格重新划分为 160000,尺寸比例为 5。摩擦模型为更适用体积成形的剪切摩擦,考虑到坯料的咬入,辊锻工序摩擦因数为 0.7,弯曲以及预锻、终锻工序摩擦因数为 0.4。坯料与模具之间的热传递系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,坯料

表 1 有限元模拟参数设定

Table 1 Setting of finite element simulation parameters

工序	参数	数值
辊锻	坯料始锻温度/ $^\circ\text{C}$	490
	模具温度/ $^\circ\text{C}$	200
	锻辊速度/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	50
弯曲	模具温度/ $^\circ\text{C}$	20
	下压速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	100
预锻	坯料始锻温度/ $^\circ\text{C}$	450
预锻、终锻	模具温度/ $^\circ\text{C}$	300
	下压速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	100

与空气的对流换热系数为 $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

2 预制坯成形过程数值模拟

2.1 辊锻

辊锻时,金属坯料在一对反向旋转的模具的连续压力作用下,通过与辊锻型槽接触产生局部塑性变形。采用此锻造方法可以在制坯时有效地使金属坯料沿长度方向进行体积再分配,提高材料的利用率。根据式(1)得到如图 2 所示的计算毛坯图,简化后得到辊锻毛坯图,以其作为辊锻模具设计的基础。辊锻毛坯的最大截面面积即为下料毛坯的截面面积,根据体积不变原则,下料时采用尺寸为 $\Phi 55 \text{ mm} \times 395 \text{ mm}$ 的挤压棒料。

$$F_A = F_d + 2\eta F_m \quad (1)$$

式中: F_A 为计算毛坯的截面面积; F_d 为模锻件的截面面积; η 为飞边充满系数; F_m 为飞边的截面面积。

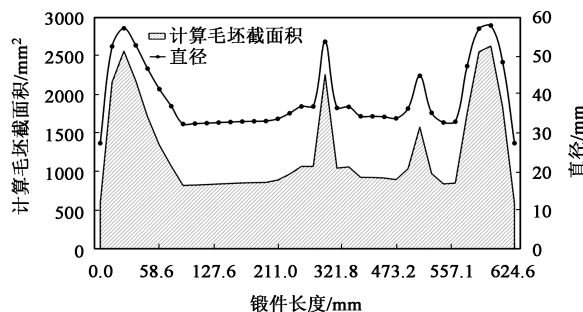


图 2 计算毛坯图

Fig. 2 Calculated billet chart

辊锻道次过多,会影响生产效率;辊锻道次过少,压下量过大,可能会产生飞边、折叠等缺陷^[7]。因此,需合理确定辊锻道次的数量,其计算公式如式(2)所示。

$$n = \frac{\lg \lambda_z}{\lg \lambda_p} \quad (2)$$

式中： n 为辊锻道次数量； λ_z 为辊锻总延伸系数； λ_p 为平均延伸系数。计算得到 $n = 2.18$ ，采用两道次辊锻。

完成横截面选型和纵向尺寸计算后，在 Solidworks 软件中使用拉伸、放样、扫描及组合等操作后得到辊锻模具模型^[8]。图 3 为经过多次模拟分析及模具结构优化得到的两道次辊锻模具。在 Deform 中进行前处理时，对一端设置流动约束，模拟夹具对坯料的夹持作用。由图 4a 可知，第 1 道次辊锻时，变形区段内坯料厚端在前时的等效应变明显小于薄端在前时的等效应变。根据第 2 道次结果可知，变形量大的区域，等效应变较大。图 4b 为两道次变形后期速度场分布，金属材料沿着锻件轴向流动，其流线形状良好，未出现交织、紊流，表明坯料在上下型槽中受力均匀。

2.2 弯曲

弯曲是为了使锻件在模锻时更好地填充，将坯料通过折弯变形使其外形更接近终锻件。因此，弯曲模具的形状主要由控制臂锻件的轮廓外形决定。由于锻件形状的限制，辊锻件两端的截面积远大于变形区段截面积，即在 U 形开口处形成回扣，无法一次弯曲成形。因此，增加一次弯曲工序，采用两步弯曲，先将两臂预弯出一定的角度，再完成 U 形锻件底部的弯曲成形。图 5 为各道次弯曲后的等效应力分布，分析可知，两道次弯曲均为局部变形，主要分布在与凹模接触的部分，整体等效应力较小。经两道次弯曲变形后，所得的弯曲

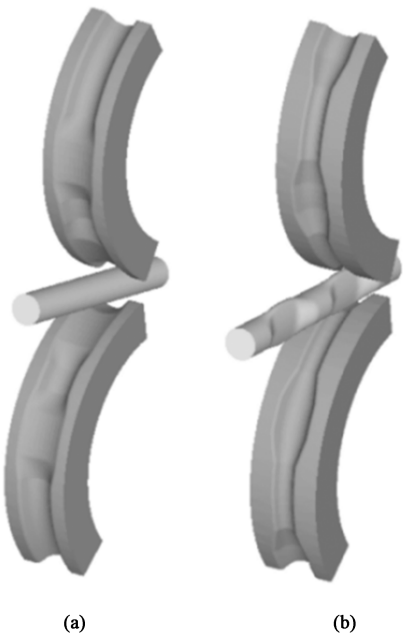


图 3 辊锻模具
(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次
Fig. 3 Roll forging dies
(a) The first pass (b) The second pass

件符合预锻外形。

3 预锻过程数值模拟

3.1 锻件成形热力耦合分析

预锻是为终锻创造更好条件的重要预成形工步，同时也是控制臂锻件成形过程中变形程度最

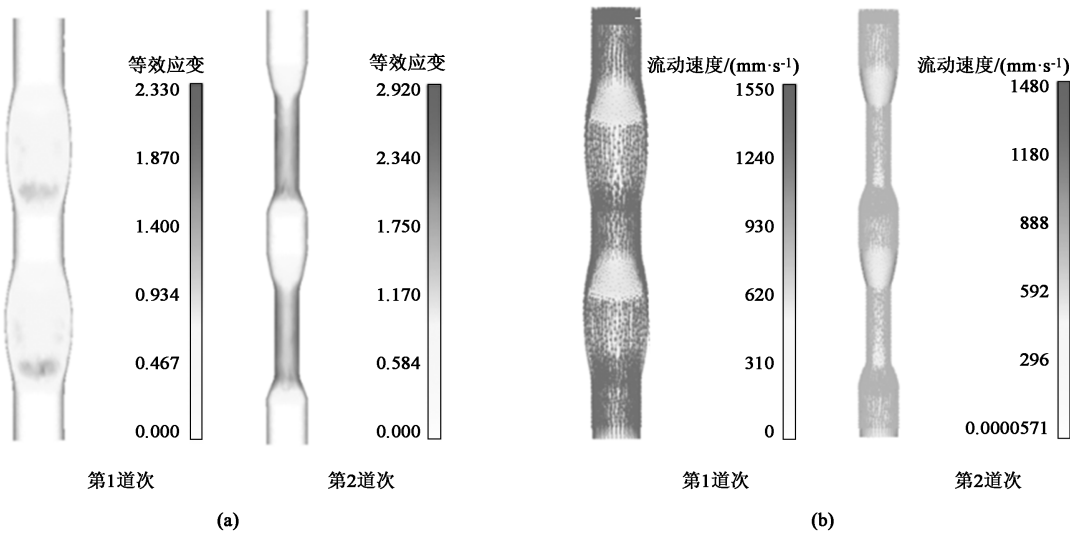


图 4 辊锻模拟结果
(a) 等效应变场 (b) 速度场
Fig. 4 Roll forging simulation results
(a) Equivalent strain fields (b) Velocity fields

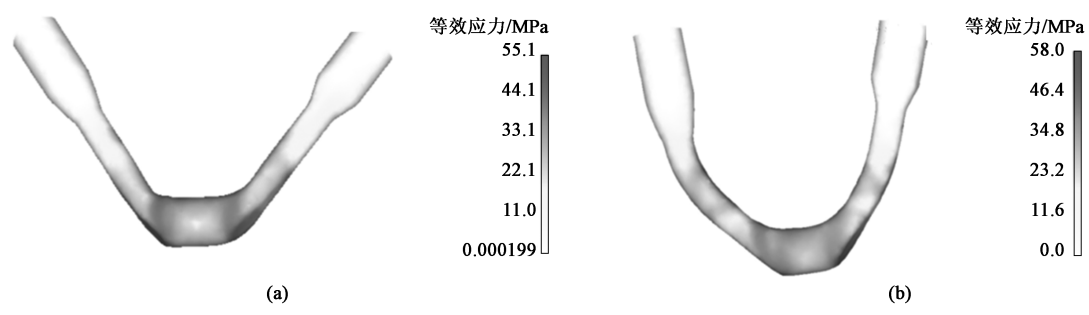


图 5 弯曲模拟结果
(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次
Fig. 5 Bending simulation results
(a) The first pass (b) The second pass

大的一道工序。因此，预锻成形质量将直接影响成形锻件的质量。图 6 为预锻模具模型，数值模拟结果如图 7 所示，预锻件填充情况良好，在锻件区域内无折叠缺陷。图 7a 为预锻件的温度分布规律，温度最低区域在两端以及连接两端靠内且高度较高的筋处，而温度最高的部分出现在预锻件边缘与飞边桥部连接处。结合等效应力场（图 7b）和 A-A 截面速度场（图 7d）分析可知：在模具下压过程中，两端及中部的大截面区域与上模优先接触并开始充填，由于变形程度小，这些区域的等效应力较小，变形产生的热量小于与模具

接触散失的热量，因此，此处温度较低，可能产生表面粗晶；随着锻模不断下压，多余的金属被挤出模膛流向飞边，由于桥部高度最小，故此处的等效应力大于 107 MPa，说明在飞边桥部金属受到的流动阻力更大，变形剧烈且流动速度更快，变形和摩擦产生热量，从而导致桥部连接处温度升高^[9]。从图 7c 可以看出，预锻时的等效应变分布与等效应力分布相似，整体应变均匀，表明预锻过程未出现局部剧烈变形。观察锻件中部凸台 A-A 截面处的速度场发现，锻件区域金属流动速度较小且均匀，未出现紊流、交织等情况。

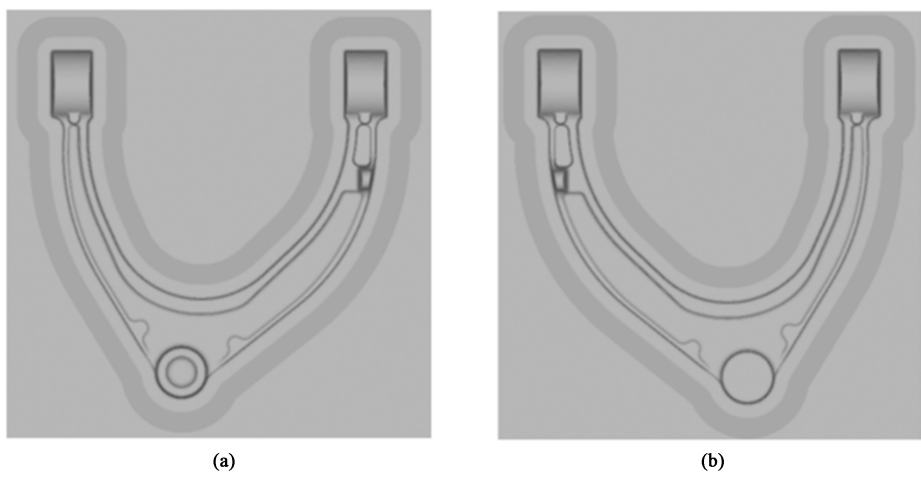


图 6 预锻模具
(a) 上模 (b) 下模
Fig. 6 Pre-forging dies
(a) Upper die (b) Lower die

3.2 坯料始锻温度对预锻件的影响

与钢质坯料不同，铝合金的锻造温度范围较窄，相关研究^[10-11]表明，在合理的锻造温度范围内对铝合金进行锻造，并适当提高坯料始锻温度，有利于

改善金属流动，减小变形抗力，提高金属的填充效果以及消除粗晶。为了得到更适合此锻件的锻造温度，在设定的其他工艺参数不变的情况下，改变坯料始锻温度。由图 8 可见，随着坯料始锻温度的升

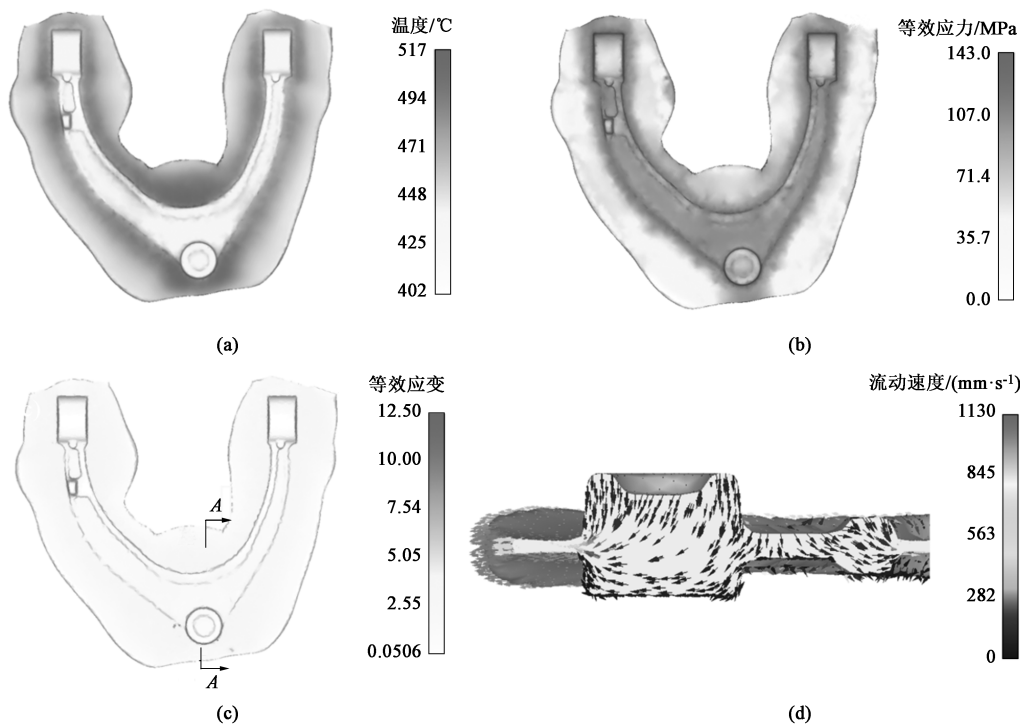


图 7 预锻模拟结果
(a) 温度场 (b) 等效应力场 (c) 等效应变场 (d) A-A 截面速度场

Fig. 7 Pre-forging simulation results
(a) Temperature field (b) Equivalent stress field (c) Equivalent strain field (b) Velocity field of A-A cross-section

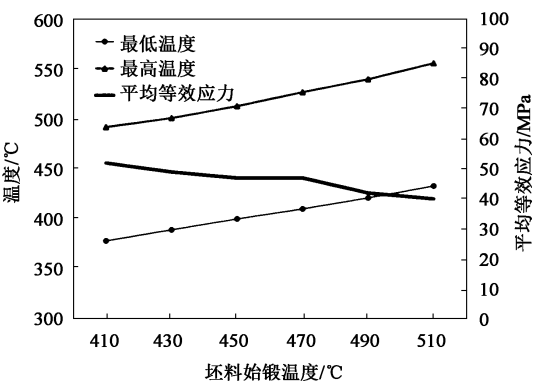


图 8 坯料始锻温度对预锻成形的影响
Fig. 8 Effect of billet initial forging temperature on pre-forging

高，最终预锻件的最低温度和最高温度均呈线性升高；平均等效应力随坯料始锻温度的升高逐渐减小。各坯料始锻温度下，锻件的最终温度均未达到过烧温度 590 ℃，由文献 [12] 可知，温度到达 570 ℃ 时，综合性能会有所下降。当始锻温度在 430 ℃ 及以下时，最低温度小于 400 ℃；当始锻温度为 510 ℃ 时，最高温度接近 570 ℃，存在综合性能下降的风险。综上，预锻时坯料始锻温度的合理范围为 450~490 ℃。

3.3 摩擦因数对预锻成形的影响

在铝合金锻造过程中，铝合金流动性差，且粘性较大。在锻造过程中对模具进行润滑，能有效改善金属流动、避免粘模，对锻件成形质量也会产生影响^[13]。图 9 为不同摩擦因数下上模的载荷-行程曲线，随着摩擦因数的减小，载荷明显减小。在锻造初期，模具与横截面高度较高的坯料相接触时，由于为局部变形，载荷相差明显；而随着模具行程继续，载荷的差距逐渐增大，当腹板和筋部开始充型时，载荷值相差较大。当摩擦因数为 0.1 时，预锻成形载荷最小，其最大载荷为 6.45×10^6 N。

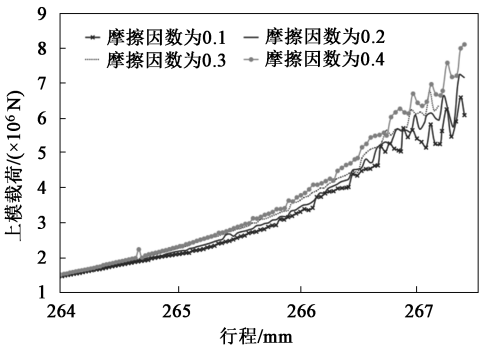


图 9 摩擦因数对上模载荷的影响曲线
Fig. 9 Effect curves of friction factor on upper die load

图 10 为不同摩擦因数对最大等效应变的影响。在锻造时,等效应变大的区域往往是锻件中难成形的部位,随着摩擦因数的增大,预锻件的最大等效应变增大。因此,改善润滑,对于改善锻件难成形部位的金属填充以及提高模具寿命具有实际意义。

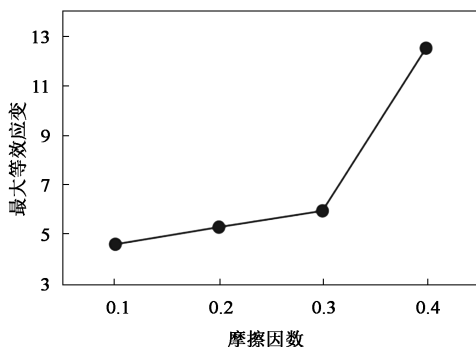


图 10 摩擦因数对最大等效应变的影响曲线

Fig. 10 Effect curve of friction factor on maximum equivalent strain

4 终锻过程模拟及试验

终锻模具是根据终锻件添加 0.8% 的冷热缩放率及考虑飞边后设计所得,坯料为第 3 节中坯料始锻温度为 450 ℃、摩擦因数为 0.4 时预锻模拟得到的预锻件。终锻件与预锻件外形相近,其变形主要是局部结构的精整。由图 11 可知,终锻件的温度分布规律与预锻件基本一致,终锻后锻件最低温度有所升高,锻件区域无折叠缺陷产生,且填充情况良好。

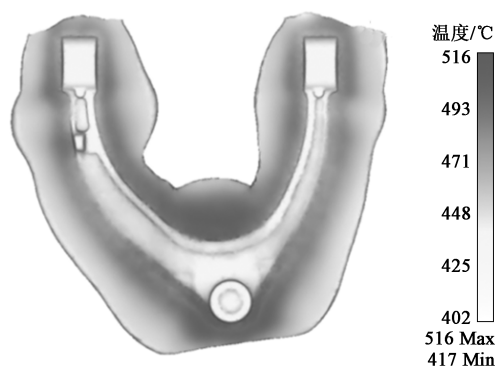


图 11 终锻件模拟结果

Fig. 11 Simulation result of final forgings

基于数值模拟结果,对样件进行试生产试验,经切边后的锻件如图 12 所示。试制锻件的两端、中部及大臂法兰等关键部位填充情况良好,与仿真锻件的形状一致,表明了成形工艺设计的合理性以及有限元模拟结果的可靠性。

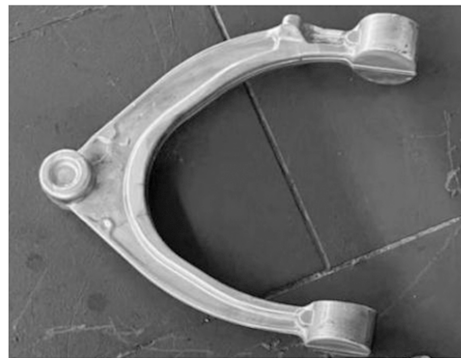


图 12 切边后的锻件

Fig. 12 Forgings after trimming

5 结论

(1) 分析了汽车铝合金控制臂的结构特征和成形难点,制定了两道次辊锻、两工位弯曲、预锻、终锻的成形工艺,并设计了各工序相应的模具。采用 Deform 软件对铝合金控制臂锻造成形过程进行了模拟,分析结果表明:各工序成形情况良好,终锻件填充基本完整,锻件区域内无折叠,同时也说明了工艺方案和模具设计的合理性。

(2) 通过单因素法研究了坯料始锻温度及摩擦因数对预锻成形的影响。结果表明:随着坯料始锻温度的升高,成形预锻件的温度升高,平均等效应力减小;在坯料始锻温度为 450~490 ℃ 时,预锻件成形的温度分布更合理;随着摩擦因数的减小,预锻上模的载荷数值下降,最大等效应变减小,改善润滑,有利于金属流动成形、并延长模具寿命。

(3) 根据模拟结果指导生产试验,获得了充填良好、无缺陷的控制臂锻件。

参考文献:

- [1] 邹喜红, 苟林林, 傅雷, 等. 基于实测载荷谱的某全域车悬架下控制臂疲劳寿命研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (7): 301-308.
Zou X H, Gou L L, Fu L, et al. Research on fatigue life of all-terrain vehicle control arm based on measured load spectrum [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43 (7): 301-308.
- [2] 孙伟, 王玲. 铝合金锻造技术在汽车工业中的应用 [J]. 锻造与冲压, 2021, (15): 20-24.
Sun W, Wang L. Application of aluminum alloy forging technology in automobile industry [J]. Forging & Metalforming, 2021, (15): 20-24.
- [3] 赵东林. 镁合金汽车控制臂铸锻复合成形工艺的研究开发

- [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Zhao D L. The Research and Development of Casting-Forging Combined Process Forming Process of Magnesium Alloy Control Arm of Automobile [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [4] 胡文硕, 郑顺奇, 陈刚, 等. 汽车控制臂锻坯结构与浇注系统优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45 (3): 81-86.
- Hu W S, Zheng S Q, Chen G, et al. Optimization of forging billet structure and gating system of automobile control arm [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45 (3): 81-86.
- [5] Qian X M, Parson N, Chen X G. Effects of Mn addition and related Mn-containing dispersoids on the hot deformation behavior of 6082 aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 764 (3): 138253.
- [6] Deng L, Zhang H D, Li G A, et al. Processing map and hot deformation behavior of squeeze cast 6082 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (7): 2150-2163.
- [7] 张辉, 石文超, 杨大强, 等. 铝合金控制臂辊锻制坯模锻工艺数值模拟 [J]. 精密成形工程, 2012, 4 (2): 60-63, 66.
- Zhang H, Shi W C, Yang D Q, et al. Numerical simulation on the roll-forging and die-forging of aluminum alloy control arms [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4 (2): 60-63, 66.
- [8] 金云光, 王雷刚, 黄瑶, 等. Solidworks 在辊锻制坯中的应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2003, (4): 36-38.
- Jin Y G, Wang L G, Huang Y, et al. Applications of Solidworks in roll forging blanking [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2003, (4): 36-38.
- [9] 陈钰金, 邵长斌, 李思奇, 等. 锻造铝合金控制臂弯曲工艺分析与优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 17-21.
- Chen Y J, Shao C B, Li S Q, et al. Analysis and optimization on bending process for forging aluminum alloy control arm [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 17-21.
- [10] 孙伟领. 铝合金控制臂锻造工艺优化与数值分析 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2020.
- Sun W L. Optimization and Numerical Analysis of Forging Process of Aluminum Alloy Control Arm [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2020.
- [11] 韦韡, 蒋鹏, 曹飞. 6082 铝合金的高温本构关系 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 100-106.
- Wei W, Jiang P, Cao F. Constitutive equations for hot deformation of 6082 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (2): 100-106.
- [12] 邹永恒, 陶虹, 徐国明, 等. 6082 铝合金热处理工艺参数的研究 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (10): 71-76.
- Zou Y H, Tao H, Xu G M, et al. Research on heat treatment parameters of 6082 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32 (10): 71-76.
- [13] 章立预. 冷温热精锻模具润滑与寿命 [J]. 锻造与冲压, 2020, (9): 32, 34-36.
- Zhang L Y. Lubrication and die life in cold, warm and precision hot forging [J]. Forging & Metalforming, 2020, (9): 32, 34-36.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2024 年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652-804 Http: //www.fstjournal.net



锻压技术微信公众号



锻压技术网站