

特种成形

## 带侧枝复杂铝合金构件包络成形工艺分析与金属流线模拟

冯 玮<sup>1,2,3</sup>, 金晔翼<sup>1</sup>, 邓加东<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070;  
3. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对带侧枝复杂铝合金构件的几何特点, 提出采用包络成形工艺成形该零件, 并利用 DEFORM-3D 软件模拟了其成形过程, 分析了等效应变和成形载荷变化特点, 并通过 DEFORM-3D 软件的 Flownet 功能模拟了该构件包络成形过程中金属流线分布和演变特点, 最后通过工艺实验进行了验证。结果表明: 带侧枝复杂铝合金构件包络成形过程中, 构件上的凸台、侧枝、飞边等结构在包络模和凹模的作用下逐渐成形, 构件右侧半圆锥形部分为大变形区, 左侧圆柱形部分为小变形区; 构件成形载荷在包络成形阶段随着成形时间的增加呈周期性波动, 在包络模保压整形阶段, 成形载荷随着保压时间的增大, 先逐渐减小, 然后呈稳定的周期性波动; 构件中间区域和右侧半圆锥形区域的金属流线变化较大, 凸台处的金属流线存在穿流、涡流和回流现象。通过比较, 该构件包络成形的模拟结果与实验结果一致。

**关键词:** 铝合金; 带侧枝复杂构件; 包络成形; 成形载荷; 金属流线

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.019

**中图分类号:** TG312

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0141-09

## Enveloping forming process analysis and metal streamlines simulation on aluminum alloy complex components with lateral branch

Feng Wei<sup>1,2,3</sup>, Jin Chaoyi<sup>1</sup>, Deng Jiadong<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Hubei Engineering Research Center for Green Precision Material Forming, Wuhan 430070, China;  
3. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** For geometric characteristics of aluminum alloy complex components with lateral branch, the enveloping forming process was proposed to form the components, and its forming process was simulated by software DEFORM-3D. Then, the change characteristics of effective strain and forming load were analyzed, and the distribution and evolution characteristics of metal streamlines were simulated in the enveloping forming process of the components by the Flownet function of software DEFORM-3D. Finally, the experiment was carried out to verify the simulation results. The results show that in the enveloping forming process of the aluminum alloy complex components with lateral branch, the structures such as bosses, lateral branches and flashes on the components are gradually formed by the action of enveloping die and concave die. The semi-conical part on the right side of the component is a large deformation area, and the cylindrical part on the left side is a small deformation area. The forming load of the component fluctuates periodically with the increasing of forming time in the enveloping forming stage, and the forming load decreases gradually with the increasing of holding time and then presents a stable periodic fluctuation in the enveloping die holding and shaping stage. The metal streamlines in the middle area and the semi-conical area on the right side of the component vary greatly, and the metal streamlines appear through-flow, eddy-flow and backflow phenomenon at the boss. By comparison, the simulation results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** aluminum alloy; complex component with lateral branch; enveloping forming; forming load; metal streamlines

随着工业技术的发展, 为了提高产品的强度和

实现轻量化, 很多零件设计了枝丫、凸台、纵横筋等各种局部结构。目前, 这类带各种局部结构的构件主要采用铸造、焊接、切削等加工方法, 效率低、成本高、材料浪费大, 而且零件性能差, 难以满足我国工业的高速发展<sup>[1-2]</sup>。

摆辗是一种局部连续塑性成形方法, 具有成形力低、生产效率高、变形均匀等一系列优点<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805391); 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B17034); 教育部创新团队发展计划项目 (IRT\_17R83)

作者简介: 冯 玮 (1973-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师

E-mail: fw7757@sina.com

传统摆辗工艺多用于成形齿轮<sup>[5]</sup>、环件<sup>[6]</sup>等回转类零件。近年来,武汉理工大学韩星会等<sup>[7-8]</sup>对冷摆辗成形非回转零件进行了大量研究,并在此基础上提出了包络成形工艺方法<sup>[9]</sup>。包络成形是一种在包络模与构件相对运动过程中,由包络模的复杂空间运动包络成构件复杂形状特征的塑性成形方法,是一种连续局部塑性成形新技术,其成形力小、材料利用率高、成形精度好,能够获得较好的金属流线,满足构件高性能、高效率成形制造的要求<sup>[10]</sup>。

金属在塑性成形过程中,内部晶粒及其夹杂物沿着塑性成形方向被挤压拉长,形成纤维组织,经腐蚀处理后,宏观上呈现的流线型条纹,即金属流线。均匀的金属流线分布可以使工件具有良好的力学性能,相反,如果流线有重大缺陷,如露头、乱流、穿流等现象,则会使工件力学性能变差。因此,国内外很多学者通过观察分析金属流线的分布来研究材料的变形特点、优化金属成形的工艺方法。宋寅哲等<sup>[11]</sup>通过仿真模拟金属流线的形态特征来预测和改进某螺栓的法兰平面的粗糙度。王辉平<sup>[12]</sup>通过数值模拟不同成形工艺参数下盘形滚刀刀圈的锻造金属流线来优化成形工艺。张玉勋等<sup>[13]</sup>通过模拟铝合金机轮轮毂锻造流线来改善成形零件的质量。周梦娟等<sup>[14]</sup>利用 DEFORM-3D 软件模拟齿轮锻造过程中金属流线的分布特点来分析齿充填的变形规律。苗站等<sup>[15]</sup>模拟分析了坯料的高径比、挤压速度和摩擦因数对某铝合金枝杈类构件金属流线的影响以及金属流线缺陷形成的原因,通过优化工艺参数,确定了最佳金属流线分布的成形方案。王琪等<sup>[16]</sup>通过研究热压汽车内水套表面金属流线特征等信息来优化零件成形工艺和流线分布,以提高零件成形质量。Shan D B 等<sup>[17]</sup>通过研究铝合金等温模锻过程中金属流线的变化分布特点,得到复杂铝合金锻件缺陷的形成机理和演变规律。Zhang Y Q 等<sup>[18]</sup>发现成形高度和摩擦因数等工艺参数对盘形零件锻造过程的金属流线有较大影响。Zheng Y 等<sup>[19]</sup>通过数值模拟和实验的方法研究了轴向闭模热轧钛合金盘的金属流线演化规律,得到了钛合金盘闭模热轧成形工艺的特点。Xin X 等<sup>[20]</sup>通过改进热挤压多孔薄壁管件模具结构,获得了更加合理的金属流线分布。

本文以园林工业中某品牌电动剪刀带侧枝铝合金底座为研究对象,利用 DEFORM-3D 软件,建立了该构件包络成形的有限元模型并模拟了其成形过程,通过分析等效应变场、成形载荷、金属流线分布和变化特点,得到带侧枝复杂铝合金构件包络成

形的金属流动特点,并利用 T630 摆辗设备进行了实验验证,以便为带侧枝复杂铝合金构件包络成形工艺的设计提供参考。

## 1 带侧枝复杂构件结构特点和包络成形工艺原理

### 1.1 带侧枝复杂构件结构特点

图 1 为园林工业中某品牌电动剪刀带侧枝铝合金底座的三维几何模型。由图 1 可知,该构件形状不规则,而且局部有一些细小的特殊结构。总体上可以将该构件近似看为一种阶梯形短轴类零件,其结构可分为两部分,即左侧的圆柱形部分和右侧的半圆锥形部分。在半圆锥形部分的上表面两侧有近似半圆形卡孔,下表面有一个凸台和凸点,此外在半圆锥形侧面还有一个厚度为 3.7 mm 的类似鱼鳍形的侧枝。构件长度为 74 mm,左端圆柱形部分的长度为 14 mm、直径为  $\Phi 28$  mm,构件材料为 6063 铝合金。由于该构件的形状复杂,采用闭式锻造工艺难以成形扁平的侧枝和凸台,而且成形载荷大,因此,根据该构件的结构特点,结合武汉理工大学前期的研究结果<sup>[21]</sup>,提出包络成形工艺来成形该零件。

### 1.2 包络成形工艺原理

根据带侧枝复杂铝合金构件的结构特点,本文将分模面确定在侧枝上表面,包络成形工艺坯料的形状选用圆柱形棒料。图 2 为该带侧枝复杂铝合金构件包络成形工艺原理图,整个工艺过程分成包络成形阶段和包络保压整形阶段。在包络成形阶段,凹模型腔水平放置,坯料放置在凹模型腔中,包络模与水平面之间的倾斜角度为  $\beta$ 。开始成形时,包络模绕中心轴线以角速度  $\omega$  作旋转运动,同时以  $\beta$  角的幅度左右摆动,凹模同时向上做进给运动(速度为  $v$ )。在包络模、坯料和凹模的相对运动过程中,通过包络模的复杂运动使坯料发生塑性变形,包络成形出所需构件,如图 2b 所示。为了保证零件的成形质量更好,在凹模停止进给后,包络模继续作回转摆动运动,进行保压整形,如图 2c 所示。

## 2 包络成形有限元模型的建立

### 2.1 包络模设计

利用包络成形工艺成形该带侧枝复杂铝合金构件的关键问题为设计包络模。本文根据文献[7]和文献[10]提供的方法来设计包络模。首先,利

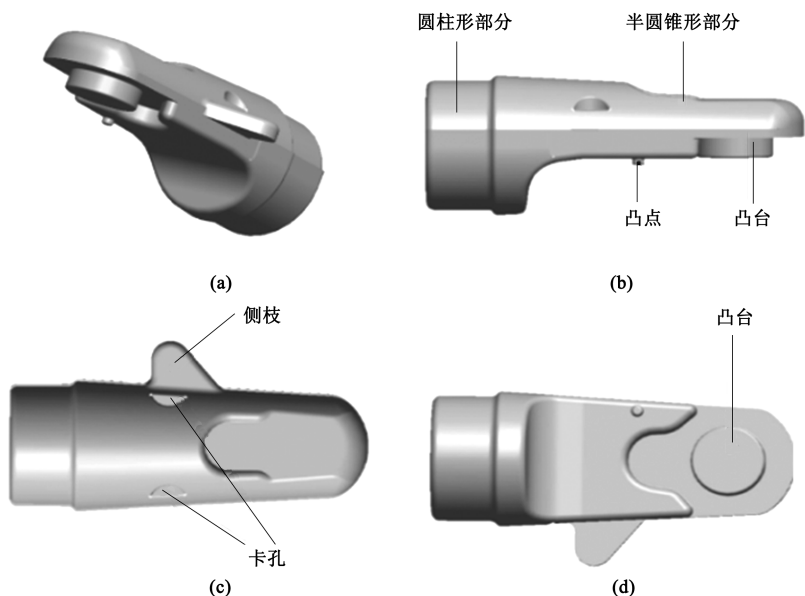


图1 带侧枝复杂铝合金构件实体模型

(a) 三维模型 (b) 正视图 (c) 俯视图 (d) 仰视图

Fig. 1 Solid model of aluminum alloy complex component with lateral branch

(a) 3D model (b) Front view (c) Top view (d) Upward view

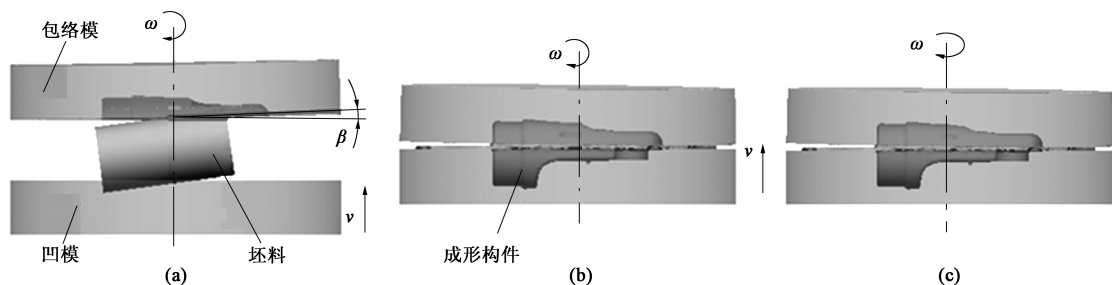


图2 包络成形工艺原理图

(a) 初始阶段 (b) 终了阶段 (c) 保压整形阶段

Fig. 2 Principle diagrams of enveloping forming process

(a) Initial stage (b) Finished stage (c) Holding and shaping stage

用 Pro/ENGINEER 软件创建构件的三维模型, 通过反求方法得到成形上模和凹模; 然后, 将上模三维模型导入 Geomagic Wrap 软件中, 并提取出上模表面的点坐标, 再根据包络模与构件上表面的几何映射关系将这些点坐标转换成包络模表面的点坐标<sup>[13]</sup>, 并将其导入到 Geomagic Wrap 中; 最后, 利用 Geomagic Wrap 将这些点转换成三维实体, 即得到了包络模三维模型。图3为包络成形带侧枝复杂铝合金构件的包络模和凹模的三维模型。

## 2.2 坯料设计

本文选择圆柱形棒料作为坯料, 由于带侧枝复杂铝合金构件的结构复杂、截面变化大, 为保证偏平侧枝和凸台能够完全充满, 坯料余量取 30%, 根

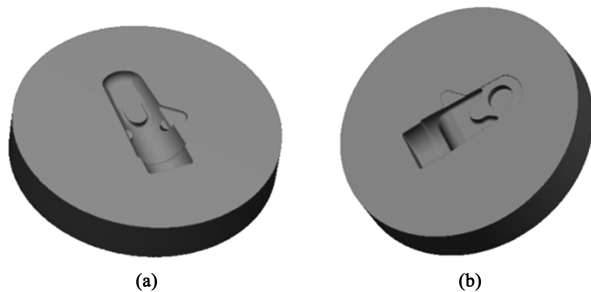


图3 包络模 (a) 和凹模 (b) 三维模型

Fig. 3 3D models of enveloping die (a) and concave die (b)

据体积不变定律, 坯料尺寸设计为  $\Phi 30 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$ 。

## 2.3 有限元模型建立

将包络模、凹模和坯料的三维模型导入 DE-

FORM-3D 有限元模拟软件中, 并设置相应的模拟参数: 包络模绕垂直轴线作回转运动, 角速度  $\omega$  为  $25.12 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 摆角  $\beta$  为  $1.5^\circ$ , 同时凹模以  $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度  $v$  向上进给。根据文献 [4] 的推荐, 构件成形完成后的飞边厚度设计为  $1.3 \text{ mm}$ , 按照包络模、坯料、凹模之间的相对位置关系, 确定凹模向上的进给距离为  $25.64 \text{ mm}$ , 因此, 凹模的进给时间为  $6.41 \text{ s}$ , 凹模进给完成后停止不动, 但是为了保证构件的成形质量更好, 包络模继续回转保压运动  $1 \text{ s}$ ; 坯料与模具间的摩擦模型为常剪切摩擦模型, 摩擦因数为  $0.2$ ; 坯料定义为塑形体, 坯料的材料选用软件自带材料 Al-6063 铝合金, 划分单元网格数为  $120000$ , 模具设置成刚体, 建立的带侧枝复杂铝合金构件包络成形的有限元模型如图 4 所示。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 等效应变分布

图 5 和图 6 分别为构件在不同成形时刻上、下表面的等效应变分布图。由图 5 和图 6 可知: 成形开始时, 坯料上表面卡孔、凹槽与包络模接触产生

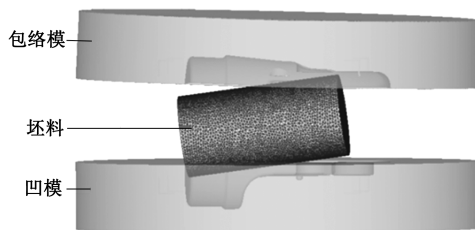


图 4 带侧枝复杂铝合金构件包络成形有限元模型  
Fig. 4 FE model of enveloping forming for aluminum alloy complex component with lateral branch

变形, 而下表面半圆锥形台阶部分、凸台根部位置在包络模的摆动压力作用下首先发生变形; 随着成形的进行, 侧枝、凸台和飞边逐渐形成, 塑性变形扩展至整个构件, 在凹模停止进给、包络成形终了时, 即时间  $t=6.41 \text{ s}$  时, 最大等效应变主要分布在半圆锥形右端和侧枝部分, 且侧枝未完全充填好。在包络保压整形阶段, 飞边继续扩大, 侧枝完全充填好。在整个成形过程中, 构件左侧圆柱形部分和半圆锥形左侧的变形均较小。

#### 3.2 金属流线分布

为了进一步分析金属材料在包络成形过程中的

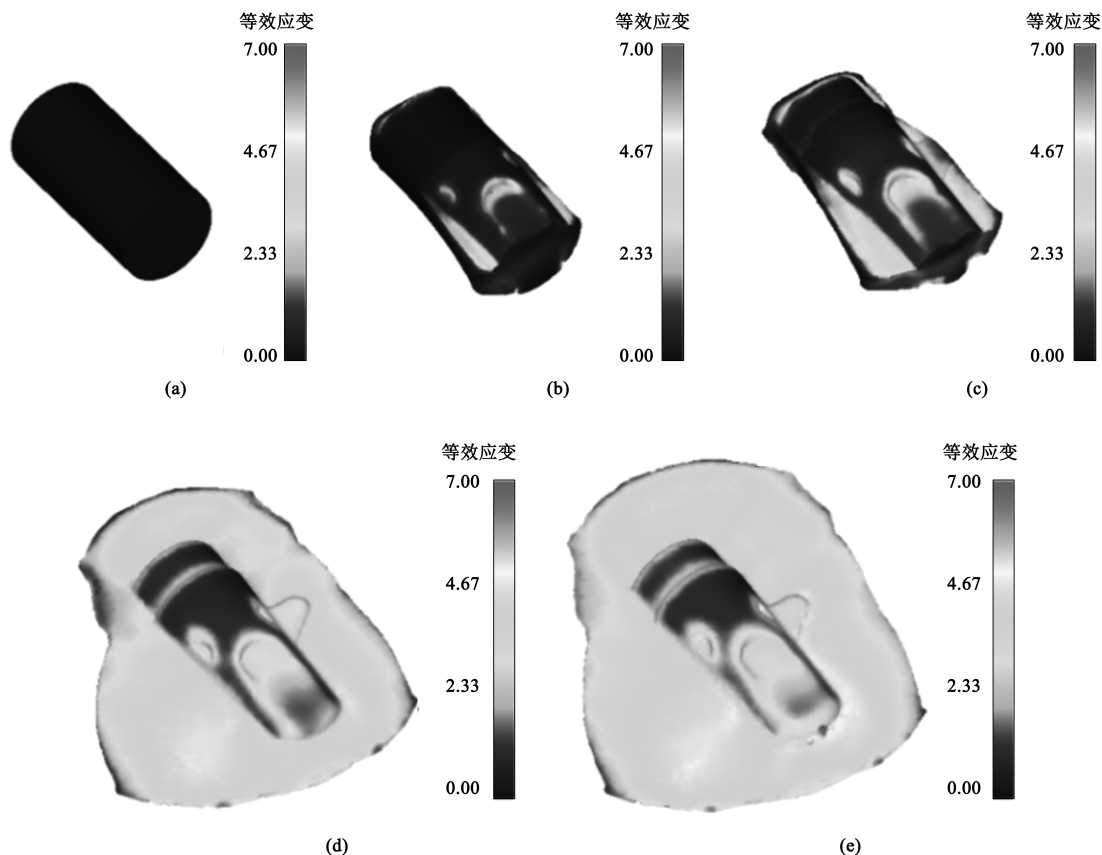


图 5 构件上表面不同时刻的等效应变分布图

(a)  $t=0 \text{ s}$  (b)  $t=4.00 \text{ s}$  (c)  $t=5.35 \text{ s}$  (d)  $t=6.41 \text{ s}$  (e)  $t=7.41 \text{ s}$

Fig. 5 Diagrams of effective strain distribution on top surface of components at different times



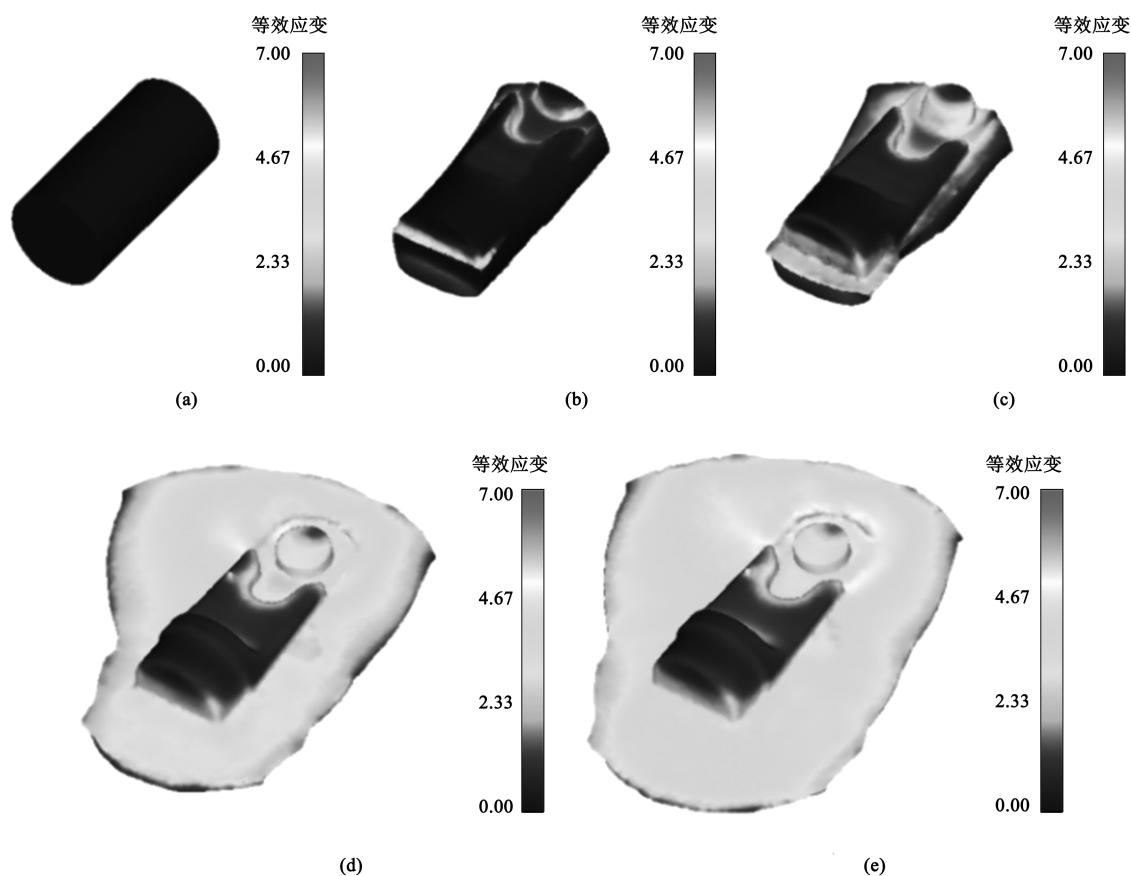


图6 构件下表面不同时刻等效应变分布图

(a)  $t=0\text{ s}$  (b)  $t=4.00\text{ s}$  (c)  $t=5.35\text{ s}$  (d)  $t=6.41\text{ s}$  (e)  $t=7.41\text{ s}$ 

Fig. 6 Diagrams of effective strain distribution on lower surface of components at different times

流动特点,本文利用有限元模拟软件 DEFORM-3D 的 Flownet 功能,在坯料过中心轴线的横截面上绘制了间距为 1 mm 的网格线,如图 7a 所示,然后模拟整个包络成形过程,得到不同时刻带侧枝复杂铝合金构件包络成形中纵剖面金属流线的分布和变化特点,如图 7b~图 7e 所示。

由图 7b 可知:在包络成形初期,构件左侧圆柱形部分和右侧半圆锥形部分左侧的网格形状基本未变化,说明左侧的金属流动很少、变形量较小;而右侧的横向网格被压缩拉长,特别是右侧上、下台阶平面过渡部分,横向网格更加致密、变形量更大,说明构件右侧金属在包络成形初期被压缩,向左流动成形半圆锥形的左侧部分;同时,构件左侧中间部分纵向的金属网格向右压缩被拉长,但金属流线的弯曲程度较小,尤其是右下角部分流入凸台型腔的网格,其形状仍为矩形,说明此处金属的变形量较小,金属主要受其他部分形变金属的推动才流入凸台型腔。构件左侧在包络模和凹模的作用下开始形成飞边。

由图 7c~图 7d 可知:随着成形的进行,构件左

侧圆柱形上、下表面部分的网格形状仍未变化,但是,靠近中间右侧部分纵向的金属流线整体逆时针旋转了一定的角度,靠近下模的网格形状被压缩拉长,说明左侧下半部分金属发生了较大变形,流向右上方,而构件左侧中间部分的金属流线向左弯曲,这是因为在包络模的作用下部分材料流入飞边槽形成飞边;构件右侧半圆锥形部分中间纵向网格既有向左弯曲也有向右弯曲,而且弯曲程度更大,特别是右半部分凸台处,金属流线出现了紊乱,这是包络成形局部塑性成形的特点所致,当包络模在某时刻只与构件右半部分接触时,构件只有右半部分金属受压发生流动,又受右侧型腔壁的阻碍,这时构件右半部分金属就会有向左流动的趋势;同时,构件右上角和左下角的金属流线相比其他部分较稀疏,且网格形状不变,说明此处金属基本不流动。

由图 7e 可知:在包络模保压整形结束时,构件左右两端飞边附近的金属流线的弯曲程度更大,网格更加致密,说明在包络模保压整形时有较多金属流入飞边槽形成飞边,为剧烈变形区;在凸台根部,

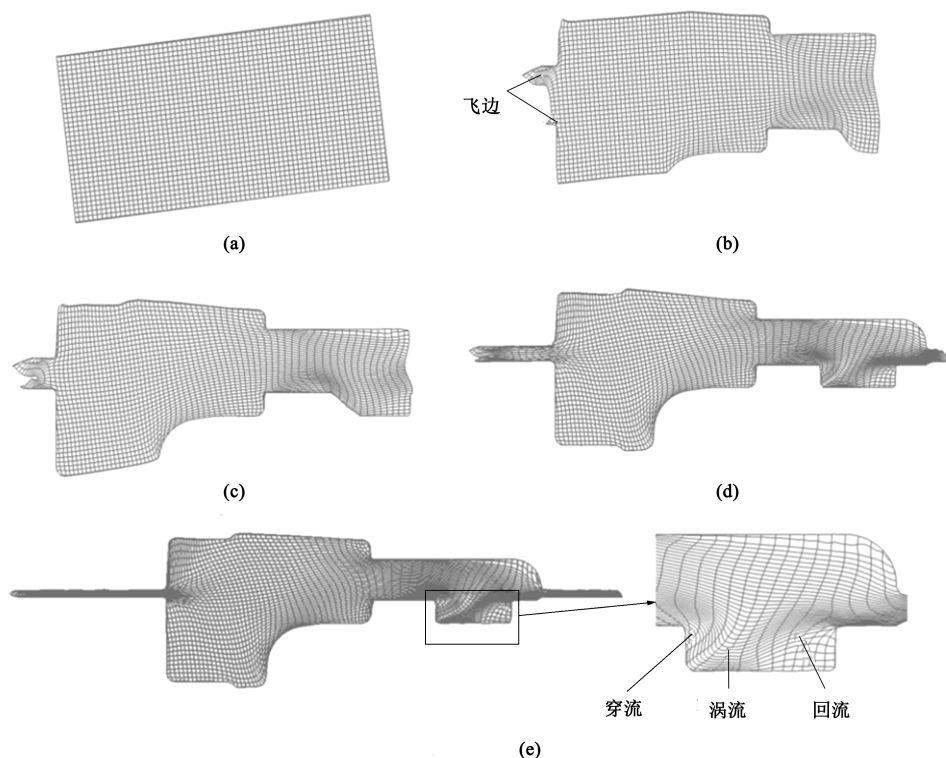


图 7 带侧枝复杂铝合金构件包络成形中纵剖面金属流线演变

(a)  $t=0\text{ s}$  (b)  $t=4.00\text{ s}$  (c)  $t=5.35\text{ s}$  (d)  $t=6.41\text{ s}$  (e)  $t=7.41\text{ s}$ 

Fig. 7 Metal line evolutions of longitudinal section for aluminum alloy complex component with lateral branch during enveloping forming

网格严重畸变,金属流线弯曲为S形,快速沿水平流动的金属切断了原有的金属流线,发生了穿流缺陷;在凸台中部,金属流线向左下方弯曲,形成涡流缺陷,这表明在成形最后阶段,为填充凸台内侧,大量金属从凸台和构件主体的交界处流入凸台型腔而充填成形凸台;值得注意的是,凸台右下角的金属流线仍然稀疏,网格基本未变形,这意味着凸台右下角在成形过程中属于刚性区。

### 3.3 载荷-时间曲线

图 8 为包络成形载荷随成形时间的变化曲线图。由图 8 可知,在包络成形带侧枝复杂铝合金构件时,成形载荷分为 2 个阶段:(1) 0~6.41 s,包络模摆动旋转运动、凹模向上进给的包络成形阶段,随着凹模进给量的增加,成形载荷呈现周期性波动,并逐渐从 0 kN 增大到 1370 kN,一方面是由于包络模复杂的动态运动特性,另一方面是由于构件表面上不同位置分布有卡孔、侧枝、凸台等形状,所以在成形过程中,包络模与坯料的接触面积是不断变化的,导致了包络成形载荷的周期性波动;(2) 6.41~7.41 s 的包络保压整形阶段,由于已成形的零件不再发生大变形,主要为飞边扩展充填侧枝,成形载荷随着整形时间的增加而逐渐减小,到后期时为稳

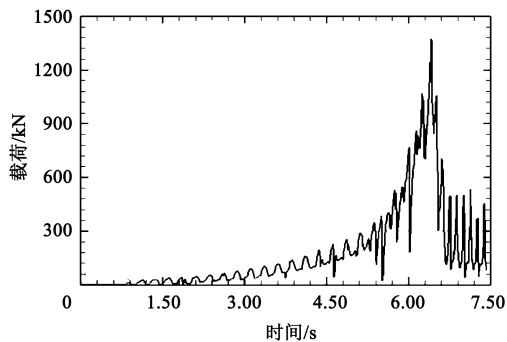


图 8 包络成形载荷-时间变化曲线

Fig. 8 Variation curve of load-time for enveloping forming

定的周期性波动。

## 4 包络成形实验

为了验证上述模拟带侧枝复杂铝合金构件包络成形工艺的可行性,本文采用了 T630 液压摆辗机进行了与模拟时相同参数设置的包络成形工艺实验,成形的实验样品如图 9a 所示,图 9b 为包络成形模拟结果。由图 9 可知,实验结果和模拟结果一致,构件的整体形状以及凸台、卡孔和侧枝等局部细小结构均能较好成形,飞边大小和形状也基本一致。

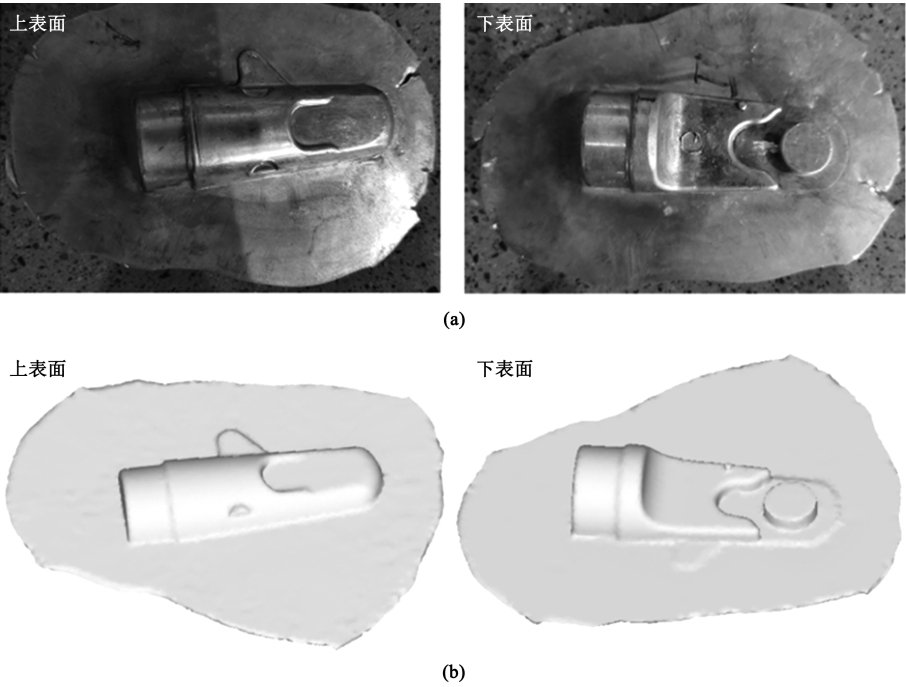


图 9 带侧枝复杂铝合金构件包络成形的实验结果 (a) 和模拟结果 (b) 对比

Fig. 9 Comparison of enveloping forming between experimental (a) and simulation (b) results for aluminum alloy complex components with lateral branch

说明该构件可以用包络成形工艺制造，建立的包络成形有限元模型是可靠的。

图 10 为利用显微镜观察的凸台部分的金属流线。由图 10 可知，金属流线较清晰，在凸台内部和

凸台根部与右侧半圆锥形台阶平面交界处的金属流线分别存在涡流和回流现象，说明在包络成形过程中，有大量金属从凸台和右侧交界处斜向下回流入凸台型腔，造成凸台被充满后流线紊乱，这个结果

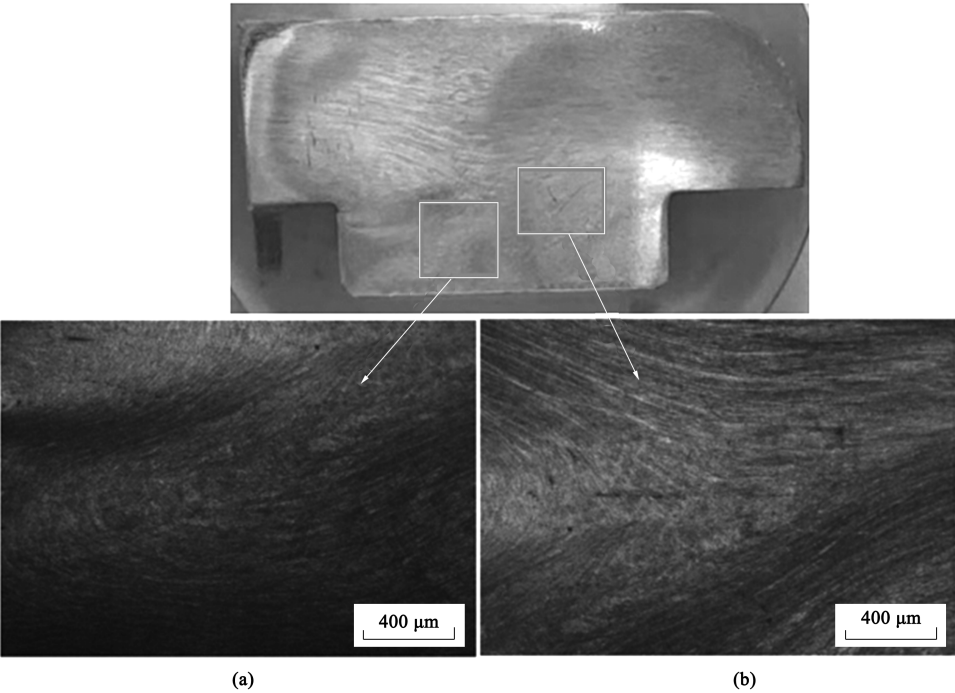


图 10 试样凸台部分的金属流线图

(a) 凸台左边 (b) 凸台根部与右侧半圆锥形底部交界处

Fig. 10 Diagrams of metal streamlines at boss area of specimen

(a) Left of boss (b) Junction between root of boss and bottom of semi-conical part on right side

与图 7e 所示金属流线的模拟结果一致。

## 5 结论

(1) 包络成形工艺成形带侧枝复杂铝合金构件是可行的, 成形模拟结果与实验结果一致。

(2) 构件表面上的卡孔、凹槽、半圆锥形台阶部分、凸台根部位置在包络模的摆动压力和凹模进给运动的作用下首先发生变形, 侧枝、凸台和飞边随着成形过程的进行逐渐形成, 成形终了时最大等效应变主要分布在半圆锥形右侧和侧枝部分。在整个成形过程中, 构件左侧圆柱形部分和右侧半圆锥形部分的左侧的变形量均较小。

(3) 带侧枝复杂铝合金构件的包络成形分为包络成形阶段和包络保压整形阶段, 在包络成形阶段, 成形载荷随着成形时间的增加呈现周期性波动, 并逐渐从 0 kN 增大到 1370 kN; 在包络保压整形阶段, 成形载荷随着保压时间的增加而逐渐减小, 然后呈稳定的周期性波动。

(4) 带侧枝复杂铝合金构件包络成形过程中, 构件中间部分和右侧半圆锥形台阶部分金属流线的变化较大, 在凸台内部出现涡流、穿流和回流现象, 金属流线的模拟结果与实验结果一致。

### 参考文献:

- [1] 李飞, 孔振, 杨力祥, 等. 镁合金电子舱体浇注系统设计与快速熔模铸造 [J]. 航天制造技术, 2018, (2): 6-10.  
Li F, Kong Z, Yang L X, et al. Rapid investment casting process for electronic cabin of magnesium alloy based on 3D printing technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018, (2): 6-10.
- [2] 邵青, 何宇廷, 张腾, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接加筋板剪切稳定性研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (20): 93-99.  
Shao Q, He Y T, Zhang T, et al. Study on stability performance of friction stir welded aluminum alloy stiffened panel under shear load [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (20): 93-99.
- [3] 王毅恒, 赵磊, 万康, 等. 摆动辗压技术概述 [J]. 科学技术创新, 2018, (9): 176-177.  
Wang Y H, Zhao L, Wan K, et al. Overview of rotary rolling technology [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018, (9): 176-177.
- [4] 伍太宾, 胡亚民. 冷摆辗精密成形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
Wu T B, Hu Y M. Cold Rotary Forging Precision Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [5] 董丽颖. 直齿锥齿轮冷摆辗宏观变形与微观组织研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [6] Hetzel A, Merklein M, Lechner M. Enhancement of the forming limits for orbital formed tailored blanks by local short-term heat treatment [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 1197-1202.
- [7] Han X H, Hua L, Zhuang W H, et al. Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (11): 2402-2416.
- [8] Han X H, Hu Y X, Hua L. Cold orbital forging of gear rack [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 117: 227-242.
- [9] Han X H, Hua L, Peng L, et al. An innovative radial envelope forming method for manufacturing thin-walled cylindrical ring with inner web ribs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 286: 116836.
- [10] 韩星会, 华林, 杨思伟, 等. 一种直线轨迹下空间包络成形包络模精确设计方法 [P]. 中国: CN201911175514. X, 2020-05-05.  
Han X H, Hua L, Yang S W, et al. An accurate design method of envelope die for space envelope forming under linear trajectory [P]. China: CN201911175514. X, 2020-05-05.
- [11] 宋寅哲, 金城旭, 任靖日, 等. 基于仿真金属流线的冷锻表面粗糙带预测及改进 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 55-60.  
Song Y Z, Jin C X, Ren J R, et al. Prediction and improvement of rough band of cold forging surface based on simulated metal flow lines [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 55-60.
- [12] 王辉平. 盘形滚刀刀圈锻造金属流线数值模拟研究 [J]. 硬质合金, 2017, 34 (4): 249-253.  
Wang H P. Numerical simulation on metal streamline of forged disc cutter ring [J]. Cemented Carbide, 2017, 34 (4): 249-253.
- [13] 张玉勋, 易幼平, 李云, 等. 铝合金机轮轮毂锻造流线仿真与实验研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42 (7): 1967-1972.  
Zhang Y X, Yi Y P, Li Y, et al. Simulation and experiment research on forging flow lines for aluminum alloy wheel-hub [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42 (7): 1967-1972.
- [14] 周梦娟, 冯玮. 圆柱螺旋齿轮热精锻过程齿变形规律的研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (7): 84-88.  
Zhou M J, Feng W. Study on tooth deformation law of cylindrical helical gear during hot precision forging [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (7): 84-88.
- [15] 苗站, 张治民, 于建民, 等. 不同参数对铝合金枝杈类构件金属流线的影 响及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 105-110.  
Miao Z, Zhang Z M, Yu J M, et al. Influence of different parameters on metal streamline of aluminum alloy part with branch and optimization [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 105-110.
- [16] 王琪, 朱鲲鹏, 陶丽佳, 等. 基于 Deform 汽车内水套的热压



- 成形工艺优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 16-22, 31.
- Wang Q, Zhu K J, Tao L J, et al. Optimization on hot pressing process of automobile inner water jacket based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 16-22, 31.
- [17] Shan D B, Zhang Y Q, Wang Y, et al. Defect analysis of complex-shape aluminum alloy forging [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2006, 16: s1574-s1579.
- [18] Zhang Y Q, Shan D B, Xu F C. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (2): 745-753.
- 
- (上接第83页)
- [5] Wang Z Z, Hu Q, Yan J W, et al. Springback prediction and compensation for the third generation of UHSS stamping based on a new kinematic hardening model and inertia relief approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (1): 875-885.
- [6] 李贵, 崔赛赛, 陈志平, 等. 先进高强钢 DP1000 地板中央通道的成形回弹及补偿研究 [J]. 材料科学与工艺, 2018, 26 (2): 15-20.
- Li G, Cui S S, Chen Z P, et al. Research on forming springback and compensation of central channel of advanced high-strength steel DP1000 floor [J]. Materials Science and Technology, 2018, 26 (2): 15-20.
- [7] Gan W, Wagoner R H. Die design method for sheet springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46 (7): 1097-1113.
- [8] Li G, Liu Y Q, Du T, et al. Algorithm research and system development on geometrical springback compensation system for advanced high-strength steel parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70 (1-4): 413-427.
- [9] 姜天亮, 龚红英, 钱勇, 等. 基于响应面法的 U 形件弯曲成形回弹优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 63-68.
- Jiang T L, Gong H Y, Qian Y, et al. Optimization on bending springback of U-shaped parts based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 63-68.
- [10] 王辉, 周杰, 熊煜, 等. 基于逆向工程的复杂曲面冲压件回弹补偿 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47 (6): 1842-1847.
- Wang H, Zhou J, Xiong Y, et al. Springback compensation of stamping parts with complex curved surfaces based on reverse engineering [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2017, 47 (6): 1842-1847.
- [11] 张辉, 赵朕, 潘爱琼. 基于蓝光扫描逆向工程的某汽车 A 柱加强板冲压成形回弹补偿 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 75-80.
- Zhang H, Zhao Z, Pan A Q. Reverse engineering of a certain automobile A-pillar reinforcement plate based on blue light scanning springback compensation [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 75-80.
- [19] Zheng Y, Liu D, Zhang Z, et al. The flow line evolution of hot open ACDR process for titanium alloy discs [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17 (4): 827-838.
- [20] Xin X, Gabriela V, Pereira A B, et al. Assessment of metal flow balance in multi-output porthole hot extrusion of AA6060 thin-walled profile [J]. Metals, 2018, 8 (6): 462.
- [21] 韩星会, 华林, 金晔翼, 等. 一种离合器外毂构件的空间包络成形方法 [P]. 中国: CN110918846A, 2020-03-27.
- Han X H, Hua L, Jin C Y, et al. A spatial envelope forming method for outer hub component of clutch [P]. China: CN110918846A, 2020-03-27.
- 
- [12] 朱东波, 马雷, 李涤尘, 等. 复杂形状板料冲压件回弹评价指标研究 [J]. 机械科学与技术, 2000, 19 (6): 97-99.
- Zhu D B, Ma L, Li D C, et al. Research on the springback evaluation index of complicated shape sheet metal stamping [J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19 (6): 97-99.
- [13] Zhang D J, Cui Z S, Ruan X Y, et al. Sheet springback prediction based on non-linear combined hardening rule and Barlat89's yielding function [J]. Computational Materials Science, 2006, 38 (2): 256-262.
- [14] 孙伟, 王岩松, 赵礼辉, 等. 基于响应面法的 DP600 高强钢 U 型件冲压拉延回弹变形研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23): 115-120.
- Sun W, Wang Y S, Zhao L H, et al. Study on the springback deformation of DP600 high-strength steel U-shaped parts based on the response surface method [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (23): 115-120.
- [15] 周驰, 朱寅, 廖娟. 金属板材冲压回弹的测量及曲率评价 [A]. 第三届全国地方机械工程学会学术年会暨海峡两岸机械科技论坛论文集 [C]. 海南: 海南省机械工程学会, 2013.
- Zhou C, Zhu Y, Liao J. Measurement and curvature evaluation of sheet metal stamping springback [A]. The Third National Academic Annual Conference of Local Mechanical Engineering Society and Strait Proceedings of Cross-Strait Mechanical Technology Forum [C]. Hainan: Hainan Mechanical Engineering Society, 2013.
- [16] 王一帆. 汽车某铝合金结构件冲压成形回弹预测及评价研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Wang Y F. Research on Springback Prediction and Evaluation of Stamping Forming of an Automotive Aluminum Alloy Structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [17] Lee S, Wollberg G, Shin S Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines [J]. IEEE Trans. vis. Comput. Graphics, 1997, 3 (3): 228-244.
- [18] 张寅飞, 安鲁陵, 神会存. 散乱测量数据多层次 B 样条逼近曲面拟合算法 [J]. 机械制造与自动化, 2005, 34 (2): 14-16.
- Zhang Y F, An L L, Shen H C. Multi-level B-spline approximation surface fitting algorithm for scattered measurement data [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2005, 34 (2): 14-16.