

基于数值模拟的铝合金四通管双向挤压精密成形工艺优化

蔡荣飞, 王辉, 唐友莉, 金香凤, 刘莉滋

(重庆三峡学院 机械工程学院, 重庆 404130)

摘要: 针对四通管传统成形工艺的不足, 提出一种铝合金四通管的双向挤压精密成形工艺。首先, 根据铝合金四通管双向挤压精密成形工艺的原理, 在三维软件 SolidWorks 中建立坯料和成形工具的三维模型, 将其导入 Deform-3D 中建立数值模拟的有限元模型, 进行初步模拟分析。然后, 根据文献调研和初步模拟分析结果确定影响零件成形质量的主要因素为坯料温度、挤压速度和模具预热温度。采用正交试验方法对铝合金四通管双向挤压精密成形工艺进行试验设计, 以坯料温度、挤压速度和模具预热温度作为试验因素, 以最大等效应力和最大冲头载荷作为优化目标, 利用 Isight 软件建立了响应面近似模型并求解得到铝合金四通管双向挤压精密成形最优的工艺参数组合为: 坯料温度为 374 °C、挤压速度为 5 mm·s⁻¹、模具预热温度为 281 °C。最后, 采用优化的参数组合进行模拟验证, 得到优化后的四通管零件无成形缺陷, 且其最大等效应力和最大冲头载荷与多目标优化结果的误差小于 3%。模拟结果表明, 所提的四通管双向挤压精密成形工艺可行, 可有效提高四通管的生产效率和材料利用率。

关键词: 铝合金四通管; 双向挤压; 坯料温度; 挤压速度; 模具预热温度; 最大等效应力; 最大冲头载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.012

中图分类号: TG386.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0089-09

Optimization on two-way extrusion precision forming process for aluminum alloy four-way pipe based on numerical simulation

Cai Rongfei, Wang Hui, Tang Youli, Jin Xiangfeng, Liu Lizi

(College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404130, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the traditional forming process for four-way pipe, a two-way extrusion precision forming process of aluminum alloy four-way pipe was proposed. Firstly, according to the principle of the two-way extrusion precision forming process of aluminum alloy four-way pipe, the three-dimensional models of billet and forming tools were established by 3D software SolidWorks, and the finite element model of the numerical simulation was established by Deform-3D to simulate and analyze preliminarily. Then, according to the literature research and preliminary simulation results, billet temperature, extrusion speed and mold pre-heating temperature were taken as the main factors affecting the forming quality of parts, and the two-way extrusion precision forming process of aluminum alloy four-way pipe was test designed by the orthogonal experiment method. Furthermore, taking the billet temperature, extrusion speed and mold pre-heating temperature as the test factors, and taking the maximum equivalent stress and the maximum punch load as the optimization objectives, the response surface approximation model was established by software Isight, and the optimal process parameters combination of the two-way extrusion precision forming process of aluminum alloy four-way pipe was obtained as the billet temperature of 374 °C, the extrusion speed of 5 mm·s⁻¹, and the mold pre-heating temperature of 281 °C. Finally, the optimized parameters combination was verified by the simulation, and it was found that the optimized four-way pipe parts had no forming defects, and the error between the maximum equivalent stress and the maximum punch load and the multi-objective optimization results was less than 3%. The results show that the proposed two-way extrusion precision forming process of four-way pipe is feasible and effectively improve the production efficiency and material utilization of the four-way pipe.

Key words: aluminum alloy four-way pipe; two-way extrusion; billet temperature; extrusion speed; mold pre-heating temperature; maximum equivalent stress; maximum punch load

四通管是连接管道分流的不可缺少的基础元件,

被广泛应用于农业灌溉、啤酒乳业、畜牧养殖和航空航天等行业^[1]。目前, 金属材料的四通管零件的成形方法主要有铸造成形、锻造成形、液压成形和机械加工等一种或几种方法的组合^[2]。铸造成形适用于一些复杂形状的管道, 但需要与其他机械加工配合, 工序繁琐且成品质量不稳定^[3]; 锻造成形得到组织致密、均匀、力学性能较好的多通管零件, 但材料利用率及生产效率较低^[4]; 液压成形主要适

收稿日期: 2023-06-28; 修订日期: 2023-09-30

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202301229, KJQN202301242)

作者简介: 蔡荣飞 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1270173950@qq.com

通信作者: 王辉 (1989-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wanghui@sanxiau.edu.cn

用于成形壁厚较薄、材料塑性较好的多通管。

四通管双向挤压精密成形的相关研究较少,相近研究主要围绕实体零件双向挤压和三通管零件挤压成形^[5]。Winiarski G 等^[6]研究了实心零件和空心管件的径向挤压成形过程,采用上、下两个冲头同时对坯料上、下端进行挤压,挤压出中间部分直径增大的零件。崔亚等^[7]研究了三通管的多向挤压成形工艺,成形后的三通管零件的力学性能较好,但是成形后管道内仍有连皮,需后续机械加工去除连皮。

针对现有工艺的不足,本文提出一种铝合金四通管的双向挤压精密成形新工艺。该工艺可有效提高四通管的生产效率和材料利用率,四通管的成形质量较为稳定,能得到少无加工零件。本文采用三维软件建立坯料以及成形工具的三维模型,借助 Deform-3D 软件对铝合金四通管双向挤压精密成形工艺进行数值模拟,并采用正交试验和多目标优化方法优化铝合金四通管双向挤压精密成形工艺参数,为多通管挤压成形工艺分析及试验试制提供参考依据。

1 铝合金四通管双向挤压精密成形工艺

图 1 为四通管双向挤压精密成形示意图。图 1a 为成形的上模和下模;图 1b 为四通管成形前、后的示意图,中心线左边为双向挤压精密成形前的状态,中心线右边为双向挤压精密成形后的状态, F 为双向挤压开始时的挤压力, F' 为挤压结束时的挤压力。坯料为中空管,其支管位置有钻孔,便于横向芯棒的放置。成形时,先将坯料放入模具中闭合,将直径为四通管内径的纵向芯棒和横向芯棒放入到中空管的对应位置。接着,将上冲头和下冲头以一定速度靠近坯料。成形过程中压机的主滑块的压力保证上模和下模闭合且不被挤压开,上冲头和下冲头施加压力使得坯料发生塑性变形,材料向支管处流动,直到成形出预定高度的支管时停止,得到少切削加工的四通管。

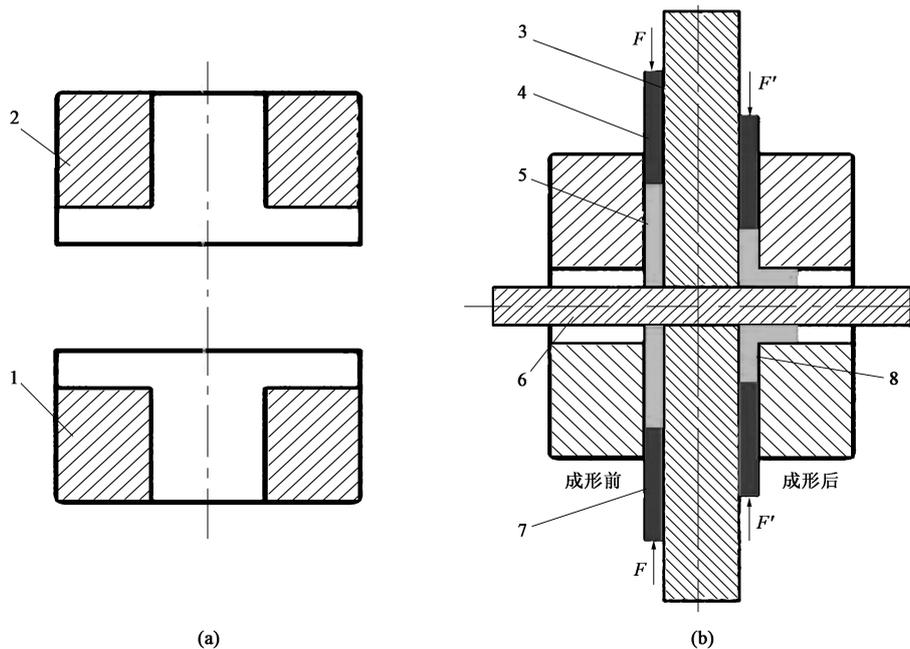


图 1 四通管双向挤压精密成形示意图

(a) 上模和下模 (b) 成形前后示意图

1. 下模 2. 上模 3. 纵向芯棒 4. 上冲头 5. 坯料 6. 横向芯棒 7. 下冲头 8. 成形后零件

Fig. 1 Schematic diagrams of two-way extrusion precision forming for four-way pipe

(a) Upper die and lower die (b) Schematic diagram before and after forming

2 有限元模型的建立

本文以如图 2 所示的四通管为研究对象,分析

四通管双向挤压精密成形过程。首先,根据四通管双向挤压精密成形的工艺特点,在三维软件 Solid-Works 中建立坯料和成形工具的三维模型,选取整体模型的 1/4 作为此次挤压仿真模型。然后,导入

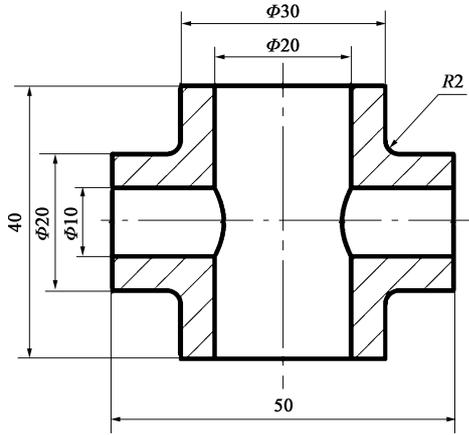


图 2 四通管零件图

Fig. 2 Part drawing of four-way pipe

Deform-3D 软件中划分坯料网格，建立的双向挤压有限元模型如图 3 所示。

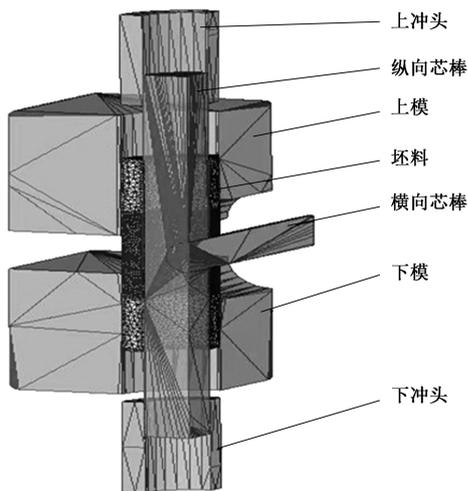


图 3 双向挤压精密成形有限元模型

Fig. 3 Finite element model of two-way extrusion precision forming

有限元模型中包含的工具具有上模、下模、上冲头、下冲头、纵向芯棒和横向芯棒。在 Deform-3D 前处理界面，添加对应工具：Upper Die、Bottom Die、Upper Punch、Bottom Punch、Object6（纵向芯棒）和 Object7（横向芯棒），并导入相应的模型。为了便于分析计算，将有限元模型中的工具设置为刚体。

有限元模型中的坯料设置为塑性体，忽略弹性形变带来的影响，假设材质均匀且具有各向同性，材料的变形流动遵循 Mises 流动准则^[8]。四通管零件材料为 6082 铝合金，有限元模型中材料选择材料库中的 ALUMINUM-6082。表 1 为 6082 铝合金的力学性能。

表 1 6082 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 6082 aluminum alloy

参数	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	伸长率/%
数值	290	210	8

有限元模型中材料的模型采用 Arrhenius 本构方程来表达材料在不同温度和应变速率下的流变应力过程^[9]。具体公式如式 (1) 所示：

$$\dot{\varepsilon} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中： $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率； A_1 、 n 及 α 为与材料有关的常数； σ 为应力峰值； Q 为变形激活能； R 为摩尔气体常数； T 为热力学温度。

通过文献 [9] 获得了 6082 铝合金的真实应力和真实应变数据，将各个参数代入式 (1)，得到的 6082 铝合金材料的本构模型如式 (2) 所示：

$$\dot{\varepsilon} = 11.96 \times [\sinh(0.0234\sigma)]^{6.47} \times \exp\left(\frac{-163.53}{8.314T}\right) \quad (2)$$

在四通管双向挤压精密成形过程中，坯料与模具发生摩擦而产生的一部分热量会传给坯料，若将该热量视为一种内热源，那被挤压件的温度就会增加，从而影响到材料本身的应力、应变属性。传热过程的热平衡方程^[10]如式 (3) 所示：

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中： q_x 、 q_y 、 q_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的热流密度； \dot{q} 为内热源； ρ 为材料密度； t 为时间； c 为比热容。

四通管成形的应力、应变与温度场有着密切关系，在模拟设置中，将模具定义为刚体，即不产生任何形变，则挤压过程产生的功可全部转化为坯料的温度。此外坯料与模具摩擦产生的表面热流也属于内热源。由此得出了管件成形的等效应力和等效应变与温度关系式为^[11]：

$$\dot{q}_{\text{坯料}} = \eta \cdot \bar{\sigma} \cdot \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

式中： $\dot{q}_{\text{坯料}}$ 为坯料的内热源； $\bar{\sigma}$ 为等效应力； $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率； η 为热转变效率，一般取 0.9。

坯料采用四面体网格，由于中间部分为大变形区，所以对中间部分进行局部网格划分，最终坯料网格总数为 64000，摩擦类型为剪切摩擦，摩擦因数为 0.2，空气温度设置为 20 °C，整个模型与空气之间的传热系数为 0.02 N · (s · mm · °C)⁻¹，坯料

与模具之间的传热系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

3 工艺参数的选择及工艺优化

对四通管双向挤压精密成形工艺进行有限元仿真, 并采用正交试验设计方法, 优化并确定最佳工艺参数, 降低制造成本, 提高四通管的质量。为了寻求最优工艺参数组合, 本文选用坯料温度 A 、挤压速度 B 、模具预热温度 C 作为影响四通管成形质量的主要因素^[12-13], 选取最大等效应力和最大冲头载荷作为评判指标。之所以这样选择, 是因为最大等效应力越大, 局部变形就越大, 变形越困难; 最大冲头载荷为材料在成形过程中所受的最大的力, 是选择成形装备的重要依据之一。

3.1 工艺参数对四通管成形的影响

3.1.1 坯料温度对四通管成形的影响

经初步调研发现, 6082 铝合金的锻造温度范围为 $300 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, 若从锻造温度两端开始研究, 由于模具预热温度和传热效果的影响, 会导致坯料温度超出加工范围, 从而影响加工效果, 在控制应变速率一致的情况下, 通过初步数值模拟确定将坯料温度范围定为 $350 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.1.2 挤压速度对四通管成形的影响

挤压速度同样是一个重要因素, 过低的挤压速度会导致坯料与模具传热增多, 使得支管口大变形区材料的流动性差, 更容易出现折叠、填充不均匀等现象, 且挤压速度越低, 四通管的生产效率也越低; 挤压速度越高, 会使得四通管的生产速度越快, 但是过高的挤压速度会使得加工硬化现象出现, 从而增加冲头的载荷, 降低了冲头的使用寿命, 同时也会使得四通管成形的等效应力增大, 影响四通管的成形质量。因此, 本文选择 $5 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的挤压速度范围进行研究。

3.1.3 模具预热温度对四通管成形的影响

模具预热一方面是为了保护模具, 另一方面, 如果模具温度过低, 零件易在挤压时造成成形困难、粘模等问题, 造成零件缺陷。合适的模具预热温度能使得坯料的塑性变形温度在一个合适的范围内, 本文选择 $200 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的模具预热温度范围进行研究。

3.2 正交试验设计

将坯料温度定义 3 个合理水平, 分别为 350 、 400 和 $450 \text{ }^\circ\text{C}$, 挤压速度定义 3 个合理水平, 分别为 5 、 10 和 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 模具预热温度定义 3 个合理水平, 分别为 200 、 250 和 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 根据这些因素

与水平拟定出一个 3 因素 3 水平的正交试验设计表, 如表 2 所示。结合 Deform-3D, 按照表 2 中输入四通管的模拟参数, 进行仿真求解。将最大等效应力和最大冲头载荷定为评价目标, 对结果进行 Isight 多目标数值分析, 找到四通管双向挤压精密成形的最优工艺参数组合。

表 2 3 因素 3 水平的正交试验

Table 2 Orthogonal experiment of three factors and three levels

水平	因素		
	$A/^\circ\text{C}$	$B/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$C/^\circ\text{C}$
1	350	5	200
2	400	10	250
3	450	15	300

3.3 试验结果

将参数组合输入 Deform-3D 参数设置中, 进行模拟仿真, 得到如表 3 所示的试验结果。

表 3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal experiment results

试验编号	A	B	C	最大等效应力/ MPa	最大冲头载荷/ kN
1	1	1	1	62.68	7.36
2	1	2	2	61.26	7.78
3	1	3	3	58.91	8.40
4	2	1	2	58.34	7.35
5	2	2	3	57.99	7.96
6	2	3	1	68.64	8.63
7	3	1	3	55.93	7.19
8	3	2	1	67.65	7.90
9	3	3	2	66.06	8.59

3.4 Isight 多目标优化

通过数值模拟取得的数据结果结合 Isight 软件建立近似模型 Approximation Model。将正交试验设计及模拟结果作为样本参数, 利用 RSM 响应面模型优化四通管的工艺参数, 模型流程见图 4。

Approximation 为近似模型模块, DOE1 为试验设计 (Design of Experiments, DOE) 模块, 按流程设置相应参数并完成优化后, 需要进行误差分析。图 5 为本次建立的响应面模型的近似模型误差分析图, 可见此次样本的实际值和预测值均靠近于对角线两侧, 说明该模型的预测较为准确, 符合此次优

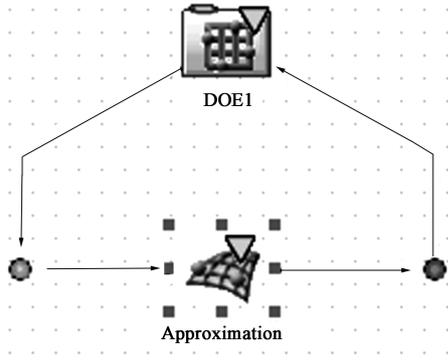


图 4 近似模型的工作流程图

Fig. 4 Work flow diagram of approximation model

化要求。表 4 为此次近似模型的误差评价结果。可以看出，近似模型中样本预测值与实际值的差值的平均值和最大值均要小于最大容差，差值的均方差同样小于最大容差，两个评价目标的相关系数 R^2 值均大于 0.9，由此也可看出该模型的预测较为准确。

在此响应面模型上设置并产生 100 组数据，并找到最优解组合为：坯料温度为 374 °C、挤压速度为 5 mm · s⁻¹、模具预热温度为 281 °C。最优解中预测的四通管成形的最大等效应力为 55.81 MPa，最大冲头载荷为 7.23 kN。将 Isight 正交试验优化得到的最优工艺参数组合通过 Deform-3D 软件进行仿真模拟，得到的四通管双向挤压精密成形的最大等效

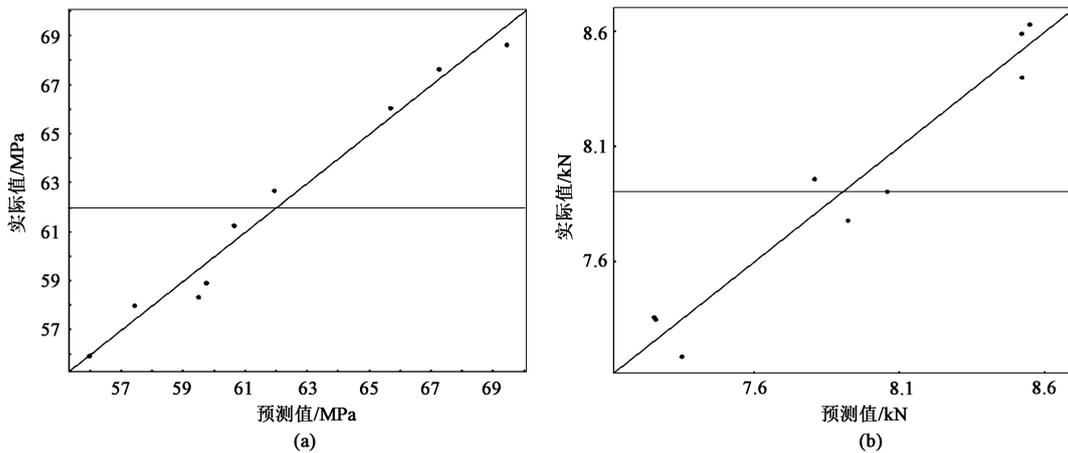


图 5 近似模型误差分析图

(a) 最大等效应力 (b) 最大冲头载荷

Fig. 5 Error analysis diagrams of approximation model

(a) Maximum equivalent stress (b) Maximum punch load

表 4 近似模型误差评价结果

Table 4 Error evaluation results of approximation model

参数	最大等效应力/MPa	最大冲头载荷/kN	最大容差
差值的平均值	0.04789	0.08339	0.2
差值的最大值	0.08969	0.11310	0.3
差值的均方差	0.05345	0.08644	0.2
R^2	0.97547	0.94128	0.9

应力为 55.20 MPa，最大冲头载荷为 7.38 kN（表 5）。最大误差分别为 1.10% 和 2.03%，误差均小于 3%，符合此次优化设计要求。

4 优化仿真结果分析

4.1 等效应力、等效应变分析

图 6 为此次优化前后四通管的等效应力分析图，

表 5 不同挤压参数结果与优化仿真结果对比

Table 5 Comparison between results of different extrusion parameters and optimization simulation result

试验编号	A/°C	B/(mm · s ⁻¹)	C/°C	最大等效应力/MPa	最大冲头载荷/kN
1	350	5	200	62.68	7.36
5	400	10	300	57.99	7.96
9	450	15	250	66.06	8.59
最优解	374	5	281	55.20	7.38

由图 6 可知，优化前后最大等效应力均发生在支管根部处，分别为 64.90 和 55.2 MPa，随着挤压的进行，两者的最大等效应力逐渐减小至 40.9 和 34.8 MPa，且最大等效应力值较为稳定。图 7 为优化后四通管双向挤压过程中的等效应力变化和追踪点的等效应力曲线，可以看出，在整个挤压过程

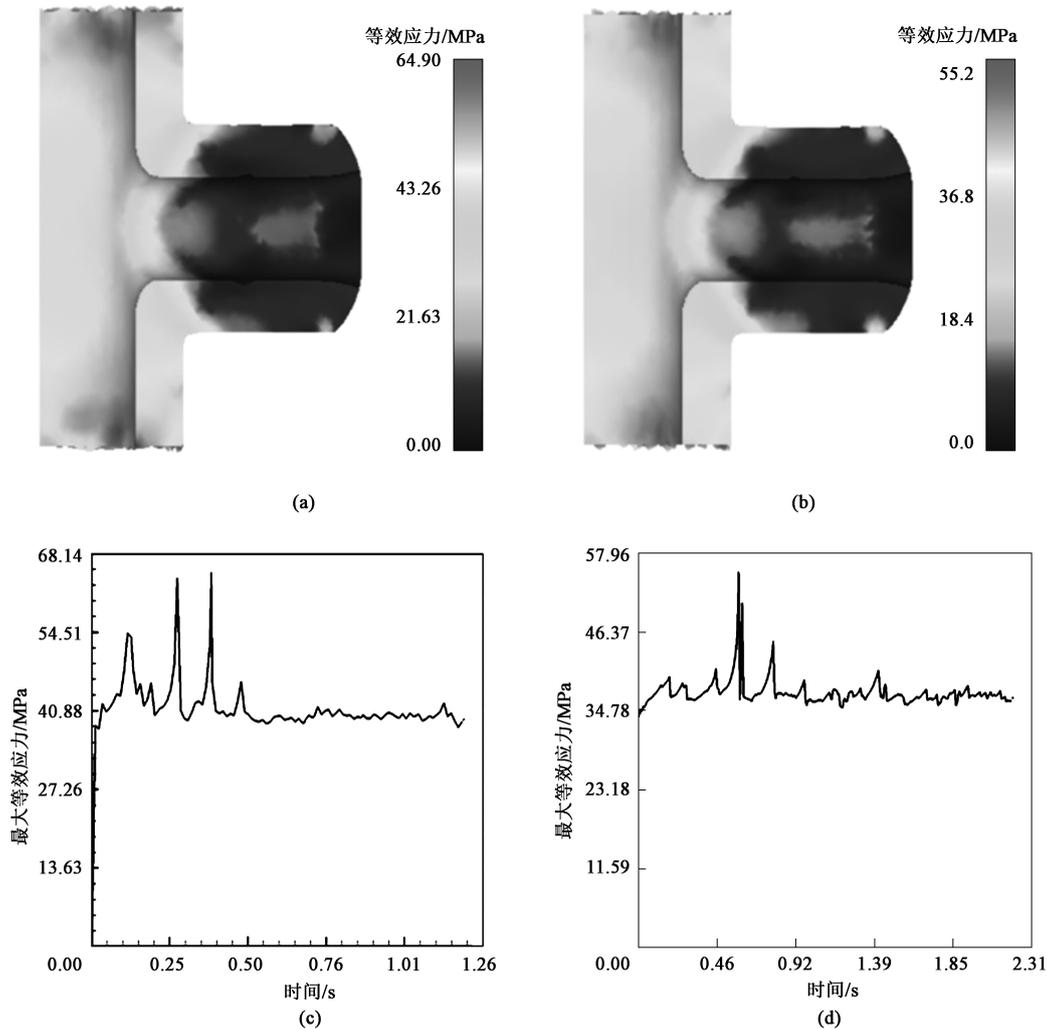


图 6 优化前后成形件的等效应力分布和最大等效应力曲线

(a) 优化前等效应力图 (b) 优化后等效应力图 (c) 优化前最大等效应力曲线 (d) 优化后最大等效应力曲线

Fig. 6 Equivalent stress distributions and maximum equivalent stress curves of formed parts before and after optimization

(a) Equivalent stress diagram before optimization (b) Equivalent stress diagram after optimization

(c) Maximum equivalent stress curve before optimization (d) Maximum equivalent stress curve after optimization

中，最大的等效应力均主要集中在支管根部附近，这是由于：成形初期坯料随着冲头的下压产生变形抗力并向横向管腔流动，此时支管根部材料局部单位面积的受力最大，所以 $P2$ 点、 $P5$ 点的等效应力不断增大。随着挤压的进行，之前位于支管根部的材料不断向横向管腔填充，支管长度随之增加，不同滑移面的位错运动难度减小，能量得到释放，这使得 $P3$ 点、 $P4$ 点、 $P7$ 点的等效应力值先增大后减小。由于纵向管口附近的坯料仅受冲头的压力和材料自身的变形抗力，所以 $P1$ 点、 $P6$ 点的等效应力值始终保持在一个稳定的范围内。经 Isight 正交试验参数优化后，四通管成形的最大等效应力值由优化前的 64.9 MPa 下降至

55.2 MPa，符合成形工艺优化要求，达到了优化效果。

由图 8 可知，四通管成形过程中，等效应变值较大的地方主要集中在主管中部、支管根部及支管中部附近，上述部位是成形件变形量较大的区域。经 Isight 正交试验参数优化后，成形件的等效应变分布更均匀，四通管成形的最大等效应变值由优化前的 13.28 下降至 7.38，这说明相较于优化前，优化后的工件成形时材料流动更均匀，成形质量更好，符合成形工艺优化要求，达到了优化效果。

4.2 冲头载荷及成形效果分析

图 9a 和图 9b 为优化前后挤压冲头的载荷曲线，结合图 9 及图 6c、图 6d 发现，挤压开始时，上、下冲头载荷迅速达到峰值，后续挤压过程中上、下

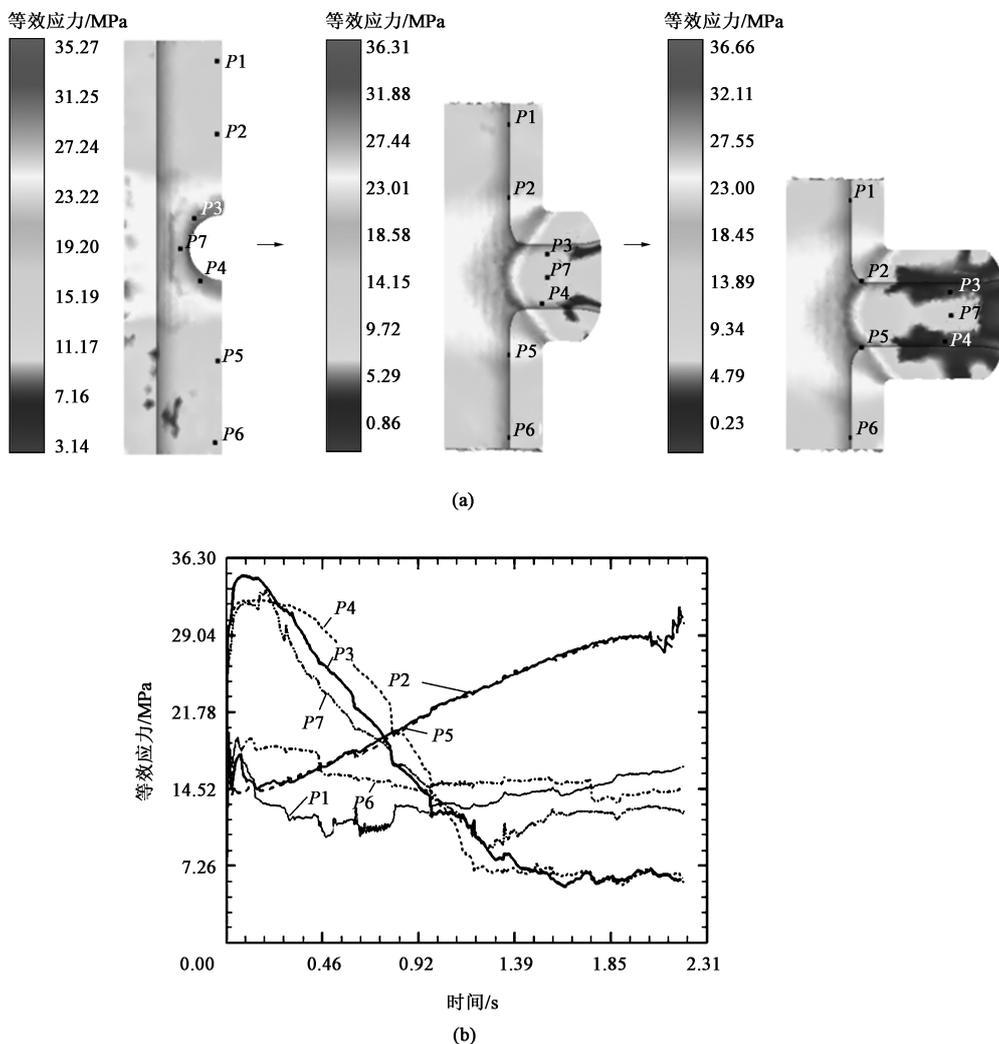


图 7 优化后四通管双向挤压期间的等效应力分布 (a) 和追踪点的等效应力曲线 (b)

Fig. 7 Equivalent stress distributions (a) and equivalent stress curves of tracking points (b) for optimized four-way pipe during two-way extrusion

冲头载荷趋于稳定,且上、下冲头无大幅载荷差异,这是由于挤压过程中的主要变形区为纵向管坯和支管转角的区域,在挤压过程中主要变形区域的面积基本保持不变,所以挤压过程的挤压力变化不大。最大等效应力和最大冲头载荷并未出现在同一个时刻,这是由于最大等效应力出现在材料的局部单位面积受力最大的区域,而最大载荷是挤压过程所有网格节点受力之和的最大值,挤压过程出现最大载荷的时刻不一定为局部单位面积变形受力最大的时刻。经 Isight 正交试验参数优化后,四通管成形的最大冲头载荷由优化前的 8.01 kN 下降至 7.38 kN,优化后冲头整体载荷变化幅度更小,冲头更加稳定,相较于优化前,优化后的工件成形时需要的载荷更小,冲头的磨损更少,从而延长了冲头的使用寿命,符合成形工艺的优化要求,达到了优化效果。

由图 9c 和图 9d 可知,未经参数优化前,材料

填充存在明显缺陷,成形后的四通管壁厚并不均匀,工件整体质量较差。经 Isight 正交试验参数优化后,四通管的填充效果较好,无明显填充缺陷,壁厚分布均匀,优化效果显著,达到了预期优化目标,保证了四通管的成形质量。

5 结论

(1) 通过正交试验方法拟定出了 3 因素 3 水平的 9 组工艺参数组合,并通过 Isight 建立响应面近似模型,分析及优化其工艺参数,得到最优的工艺参数组合为:坯料温度为 374 °C、冲头挤压速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具预热温度为 281 °C。

(2) 四通管零件的成形效果较好,材料流动均匀,壁厚分布均匀,无明显填充缺陷,优化效果显著。优化后的仿真最大等效应力为 55.2 MPa、最大

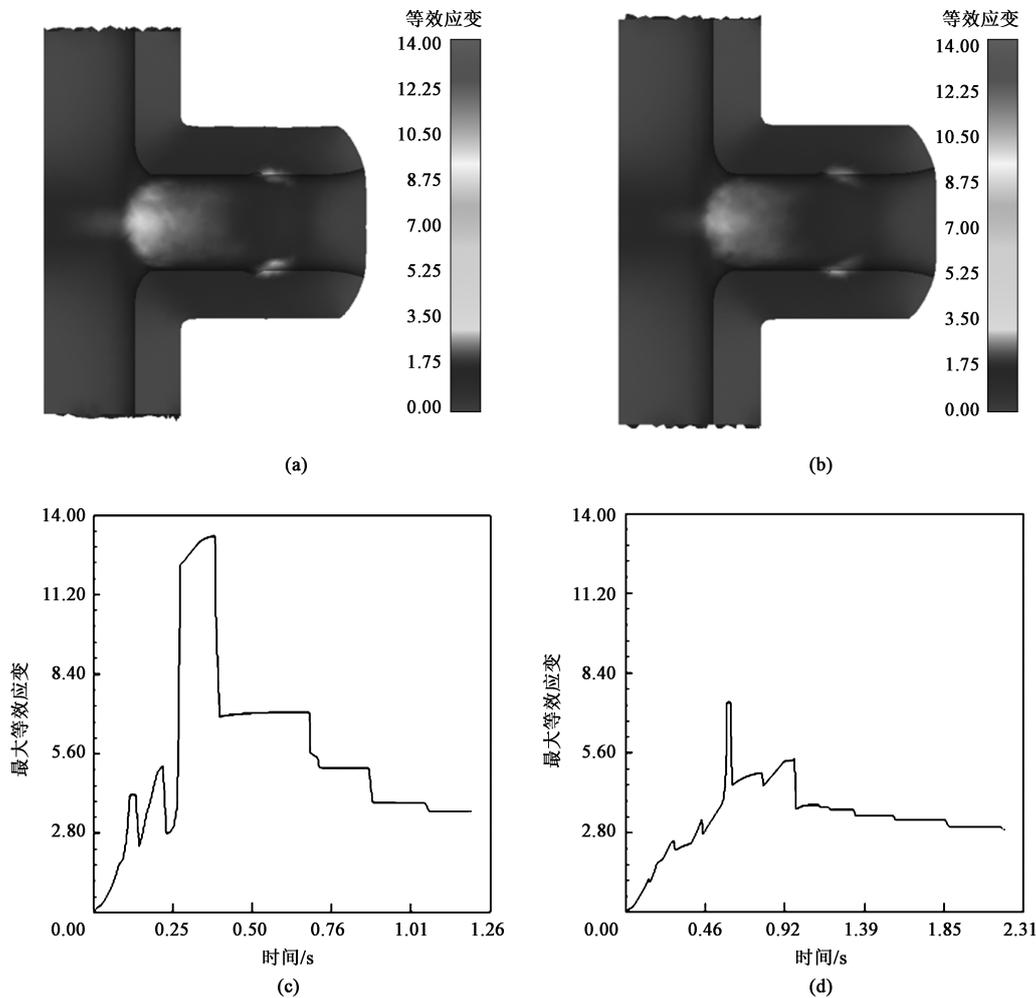


图 8 优化前后四通管的等效应变分布和等效应变曲线

(a) 优化前等效应变分布 (b) 优化后等效应变分布 (c) 优化前最大等效应变曲线 (d) 优化后最大等效应变图曲线

Fig. 8 Equivalent strain distributions and equivalent strain curves of four-way pipe before and after optimization

(a) Equivalent strain distributions before optimization (b) Equivalent strain distributions after optimization
(c) Maximum equivalent strain curve before optimization (d) Maximum equivalent strain curve after optimization

冲头载荷为 7.38 kN, 与多目标优化结果的误差小于 3%, 符合挤压工艺要求。

(3) 数值模拟和优化结果表明本文提出的铝合金四通管双向挤压精密成形工艺可行, 为四通管的双向精密挤压成形工艺设计提供了依据。

参考文献:

- [1] Lin G, Song W, Feng D, et al. Study of microstructure and mechanical property heterogeneity thro Solidwork shout the wall thickness of high strength aluminum alloy thick-wall pipe [J]. Journal of Materials Research, 2019, 34 (15): 2736-2745.
- [2] 陈名涛. 多通管辗胀复合成形工艺和微观组织演变规律研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Chen M T. Study on Composite Forming Process and Microstructure Evolution Law of Multi-pass Pipe Upsetting [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [3] 郭亚明, 张宝红, 张治民. 三通零件成形过程的数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (3): 100-103.
Guo Y M, Zhang B H, Zhang Z M. Numerical simulation study on forming process of tee parts [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (3): 100-103.
- [4] 张玉福, 马颖, 胡国栋, 等. 含裂纹锻造三通管有限元计算及安全评定 [J]. 石油化工设备, 2010, 39 (5): 13-17.
Zhang Y F, Ma Y, Hu G D, et al. Finite element calculation and safety assessment of cracked forged tee pipe [J]. Petrochemical Equipment, 2010, 39 (5): 13-17.
- [5] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. 多向锻造技术研究进展 [J]. 材料导报, 2007, 21 (2): 106-108.
Guo Q, Yan H G, Chen Z H, et al. Research progress of multi-directional forging technology [J]. Materials Reports, 2007, 21 (2): 106-108.
- [6] Winiarski G, Gontarz A, Dziubińska A. The influence of tool geometry on the course of flanges radial extrusion in hollow parts [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17 (4): 986-996.

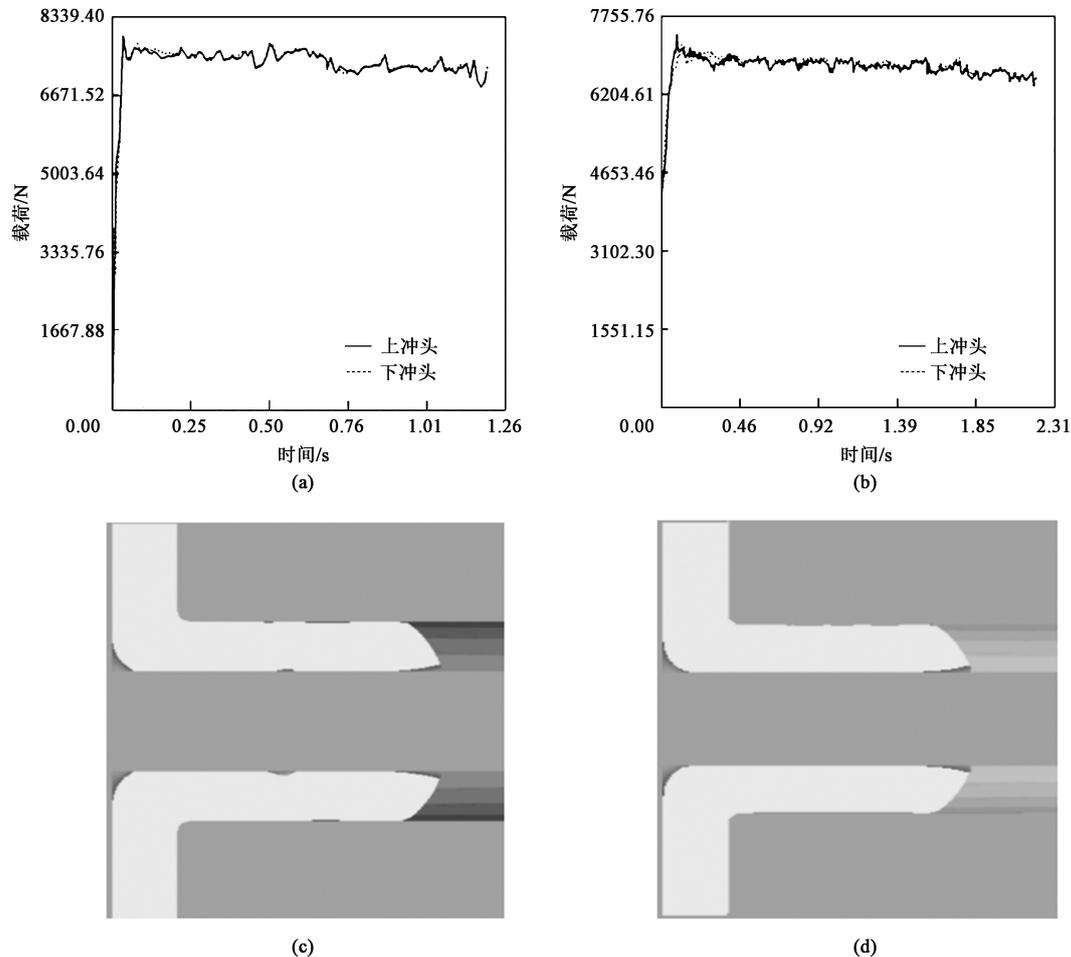


图 9 优化前后的冲头载荷曲线及成形效果图

(a) 优化前的冲头载荷 (b) 优化后的冲头载荷 (c) 优化前的成形效果图 (d) 优化后的成形效果图

Fig. 9 Punch load curves and forming effect diagrams before and after optimization

(a) Punch load before optimization (b) Punch load after optimization (c) Forming effect diagram before optimization

(d) Forming effect diagram after optimization

- [7] 崔亚, 张治民, 于建民, 等. 多向挤压模具及三通件的成形流动分析 [J]. 精密成形工程, 2009, 1 (2): 30-33.
Cui Y, Zhang Z M, Yu J M, et al. Characteristics of multi-directional extrusion and the analysis of metal flow for three links components [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1 (2): 30-33.
- [8] 彭颖红. 金属塑性成形仿真技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
Peng Y H. Simulation Technology of Metal Plastic Forming [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999.
- [9] 胡道春. 6082 铝合金高温变形行为及精锻工艺数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (9): 927-930.
Hu D C. Numerical simulation of high temperature deformation behavior and precision forging process of 6082 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35 (9): 927-930.
- [10] 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.
- [11] 蒋立鹤, 王方旋, 权国政, 等. 基于多场耦合有限元法的大规格电锻成形工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 14-21.
Jiang L H, Wang F X, Quan G Z, et al. Optimization of large-format electric upsetting process based on multi-field coupled finite element method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 14-21.
- [12] 孙伟. 基于有限元的铝合金管材挤压成形数值模拟 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
Sun W. Numerical Simulation of Extrusion Forming of Aluminum Alloy Pipe Based on Finite Element [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [13] 王昊天. 高强度镁合金方形三通差温多向挤压仿真及试验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
Wang H T. Simulation and Experimental Study on Multi-directional Extrusion of Square Tee Differential Temperature of High-strength Magnesium Alloy [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.