

模具

TC4 钛合金 T 形薄壁型材挤压模具设计及优化

李静静¹, 赵剑博¹, 张志强², 孟凡玲¹, 柏春光²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 中国科学院金属研究所 师昌旭先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 挤压模具的合理设计在钛合金挤压型材的生产中起着关键作用。使用有限元软件对 TC4 钛合金 T 形薄壁型材挤压过程进行了数值模拟。采用单因素法和正交实验法对不同结构参数进行了模拟组合, 以出口标准速度场偏差 *SDV* 值作为参考依据, 研究了入口圆角、模孔位置以及导流槽形状对挤压后金属成形效果的影响, 并分析了挤压过程中金属的流动规律。研究结果表明: 在挤压工艺条件不变的情况下, 调整模具入口圆角和模孔型心与模具圆心的距离, 能够获得形状较好的型材; 调整导流槽形状可进一步优化模具, 使金属流出模孔的速度更均匀。

关键词: TC4 钛合金; 金属流动速度; 导流槽; 挤压模具; 结构参数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.022

中图分类号: TG372

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 11-0159-08

Design and optimization on extrusion die for TC4 titanium alloy T-shaped thin-walled profile

Li Jingjing¹, Zhao Jianbo¹, Zhang Zhiqiang², Meng Fanling¹, Bai Chunguang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Reasonable design of extrusion die plays a key role in the production of titanium alloy extrusion profile. Therefore, the extrusion process of TC4 titanium alloy T-shaped thin-walled profile was numerically simulated by finite element software, and the different structural parameters were simulated and combined by single factor method and orthogonal experimental method. Then, taking standard deviation value *SDV* of outlet velocity field as a reference, the influences of inlet fillet, mold hole position and guide groove shape on the metal forming effect after extrusion were investigated, and the metal flow rule during the extrusion process was analyzed. The research results show that when the extrusion process conditions remain unchanged, the profile with a better shape can be obtained by adjusting the mold inlet fillet and the distance between mold hole center and mold circle center, and adjusting the shape of guide groove can further optimize the mold and make the metal flow out of the mold hole more evenly.

Key words: TC4 titanium alloy; metal flow velocity; guide groove; extrusion mold; structural parameters

TC4 钛合金是一种 $\alpha+\beta$ 相钛合金, 因其具有高强度、优异的耐蚀性和高低温性能等特点, 被广泛应用于石油化工、能源、航空航天等领域^[1-2]。TC4 钛合金在加工过程中, 变形抗力较大、加工所需温度较高且加工窗口较窄^[3], 导致其加工困难。挤压成形是 TC4 钛合金的主要成形方法, 该方法可最大程度地

提高 TC4 钛合金的塑性成形能力。在挤压成形过程中, TC4 钛合金需要在设计好的模具中经过复杂的流动过程, 最终在模具中充填和成形^[4]。因此, 挤压模具的设计、制造和使用是 TC4 钛合金型材挤压生产中首要解决的问题。模具设计不合理会导致出口处金属流动速度不均匀, 进而引起挤压后型材出现弯曲、扭转、裂纹等缺陷^[5]。尤其是在 TC4 钛合金薄壁型材成形过程中, 由于薄壁型材相对于其他类型材变形量更大、且不同壁厚处变形量不均匀, 大大增加了模具设计的难度, 极易因模具设计不当而造成损失。

实际工业生产中挤压模具的设计通常依靠从业者的个人经验, 缺乏相应的理论基础。模具需经过多次

收稿日期: 2023-03-14; 修订日期: 2023-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0306201)

作者简介: 李静静 (1984-), 女, 博士, 讲师

E-mail: jjli@alum.imr.ac.cn

通信作者: 张志强 (1981-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: zqzhang@imr.ac.cn

尝试和修正才能挤压出质量合格的制品,大大降低了生产效率^[6]。近年来随着有限元技术的快速发展,数值模拟技术受到了越来越广泛的关注,已经成为研究、设计挤压模具的重要方法^[7]。通过对钛合金型材挤压过程进行有限元数值模拟,可以达到揭示金属流动规律、分析缺陷形成原因、指导模具设计等目的^[8]。

本文使用有限元软件对 TC4 钛合金 T 形薄壁型材挤压过程进行了模拟分析,采用金属出口标准速度场偏差 SDV 值作为参考依据,从入口圆角、模孔位置以及增加导流槽 3 方面对挤压模具进行了设计优化,达到了平衡模具内部金属流动速度的目的。本文为 TC4 钛合金 T 形薄壁型材实际挤压模具的制作提供了参考,可有效减少试模、修模次数、降低生产成本、缩短模具设计周期。

1 有限元模型的建立

1.1 模具模孔尺寸确定

在设计模孔尺寸时,除了参考型材制品的尺寸,还需综合考虑挤压型材的结构参数、型材和模具的

热膨胀系数、型材拉伸矫直时的断面收缩率和模具的磨损修正等因素的影响^[9]。

本文中模孔尺寸采用式 (1) 进行计算:

$$A_k = A_m + (C_T + C_w + C_j)A_m + \Delta \quad (1)$$

式中: A_k 为模孔的实际尺寸; A_m 为型材断面的名义尺寸; Δ 为型材尺寸的正公差 (图 1a); C_T 为金属的热收缩系数, $C_T = a_x t_x - a_m t_m$; a_x 、 a_m 分别为型材和模具的线膨胀系数,本文中 TC4 钛合金型材和模具材料的线膨胀系数分别为 9.5×10^{-6} 和 $1.14 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; t_x 、 t_m 分别为型材和模具的温度,根据 TC4 钛合金的相变点为 $995 \text{ } ^\circ\text{C}$,本模拟设定 TC4 钛合金坯料加热温度为 $1100 \text{ } ^\circ\text{C}$,模具温度为 $200 \text{ } ^\circ\text{C}$; C_w 为模具工作带形状畸变引起的型材尺寸减小系数,对于钛合金型材挤压,通常取 $0.01 \sim 0.03$; C_j 为拉伸矫直引起的型材尺寸减小系数,通常为 $0.005 \sim 0.010$ 。本模拟中, C_w 和 C_j 分别取常用区间的中间值,即 0.0200 和 0.0075 。

通过式 (1) 计算所得 TC4 钛合金 T 形型材挤压模具模孔尺寸如图 1b 所示。

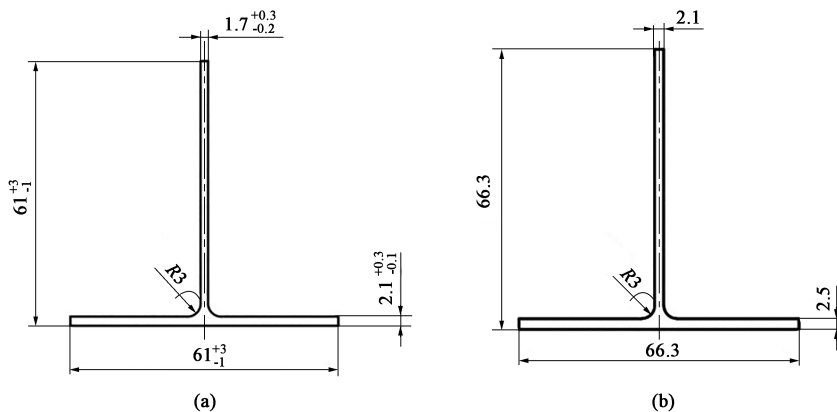


图 1 TC4 钛合金 T 形型材截面尺寸示意图 (a) 和计算所得的模孔尺寸 (b)

Fig. 1 Schematic diagrams of sectional dimensions for TC4 titanium alloy T-shaped profile (a) and calculated dimensions of mold hole (b)

1.2 三维有限元模型建立

根据计算的模孔尺寸,绘制出挤压模具三维有限元模型,如图 2 所示。为了研究入口圆角和模孔位置对挤压过程的影响,本文首先设计了入口圆角分别为 $R3$ 、 $R5$ 和 $R7 \text{ mm}$ 、模孔型心与模具圆心分别相距 10 、 20 和 30 mm (记为 $X10$ 、 $X20$ 和 $X30$) 共 9 种模具。研究了此 9 种模具对挤压过程的影响,挑选出了最优模具。在此基础之上,通过加入导流槽对模具进行了进一步的优化设计。图 3 为本文主要研究的 3 种可变模具结构参数示意图。模拟分析时采用四面体网格对坯料进行网格划分。坯料为圆柱体,直径为 $\Phi 155 \text{ mm}$ 、厚度为 15 mm 。为保证型材

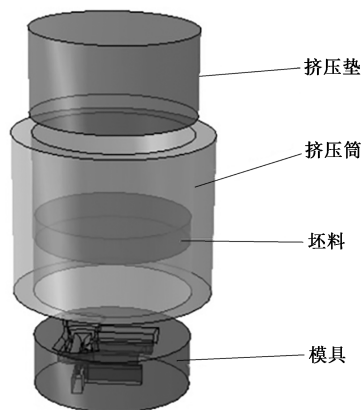


图 2 三维有限元挤压模具模型

Fig. 2 3D finite element model of extrusion mold

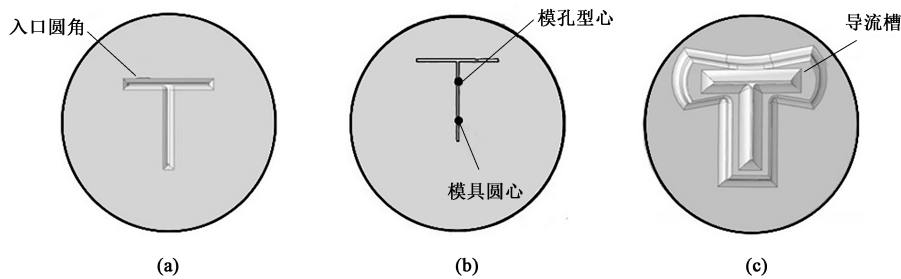


图 3 3 种可变模具结构参数示意图

(a) 入口圆角 (b) 模孔位置 (c) 导流槽

Fig. 3 Schematic diagrams of structure parameters for three kinds of variable molds

(a) Inlet fillet (b) Position of mold hole (c) Guide groove

最小截面壁厚处至少有 3 个单元网格，最小网格尺寸为 0.5 mm，整体坯料划分为 327242 个网格。表 1 为具体挤压过程模拟参数。

表 1 TC4 钛合金 T 形薄壁型材挤压工艺参数

Table 1 Extrusion process parameters of T-shape thin-walled profile for TC4 titanium alloy

参数	数值
挤压比	88
挤压筒内径/mm	Φ160
工作带长度/mm	20
挤压速度/(mm·s ⁻¹)	50
坯料预热温度/℃	1100
模具温度/℃	200
挤压筒温度/℃	450
挤压垫温度/℃	300

此外，在钛合金型材挤压成形过程中，型材出口截面金属流动速度的均匀性直接决定了型材最终

的尺寸和成形效果^[10]。本文采用了标准速度场偏差 (Standard Deviation of the Velocity Field, *SDV*) 作为评判指标 (式 (2))。通过提取型材出口处各质点的金属流速值，求得模具出口处的标准速度场偏差 *SDV* 值，以此作为挤压后型材能否稳定成形的判定依据^[11]。

$$SDV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_{ave})^2}{N}} \quad (2)$$

式中： v_i 为出口截面上节点 i 的轴向金属流动速度； $i=1, 2, \dots, N$ ； N 为选取的节点数目； v_{ave} 为出口截面上所选节点的平均轴向金属流动速度。

2 入口圆角和模孔位置的影响

2.1 入口圆角为 R3 mm 时模孔位置的影响

当入口圆角为 R3 mm 时，模拟所得到的 3 组具有不同模孔位置模具的出口金属流动速度分布如图 4 所示。

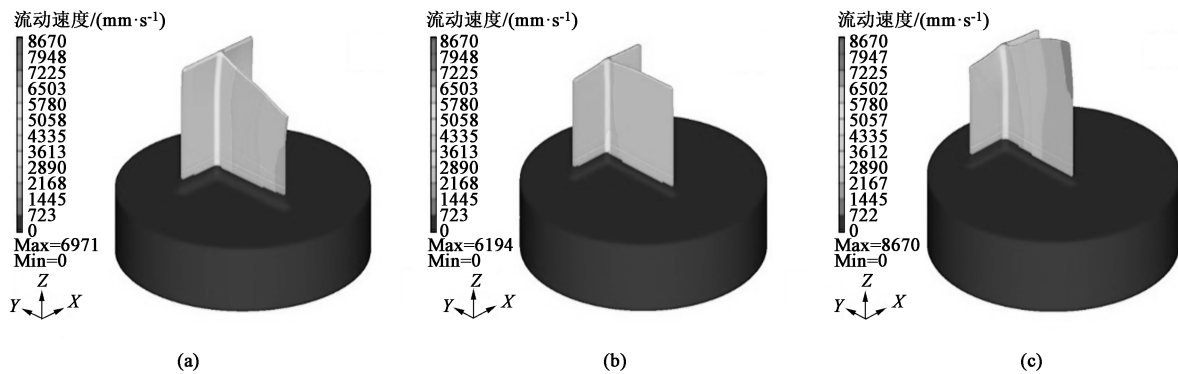


图 4 入口圆角为 R3 mm 时不同模具出口金属流动速度分布

(a) 模孔型心距模具圆心 10 mm (b) 模孔型心距模具圆心 20 mm (c) 模孔型心距模具圆心 30 mm

Fig. 4 Distributions of metal flow velocity at different mold outlets with inlet fillet of R3 mm

(a) Distance from mold hole center to mold circle center of 10 mm (b) Distance from mold hole center to mold circle center of 20 mm

(c) Distance from mold hole center to mold circle center of 30 mm

挤压模具中, 模具圆心处的金属流动速度最大。随着与圆心距离的增大, 金属流动速度逐渐减小。在入口圆角为 $R3\text{ mm}$ 的 3 组模具中, 由于每组模具圆心与型心距离不同, 3 组模具的金属流动速度分布存在明显不同。当模孔型心与模具圆心相距 10 mm 时 (图 4a), T 形型材水平方向 (图 5a) 的金属流动速度基本相同。在垂直方向, 不同位置因与圆心距离不同而存在较大的速度差别。此外, 比较水平和垂直方向的流动速度可知, 该模具的 T 形水平方向因距离模具圆心更近, 导致该方向的金属流动速度大于垂直方向。水平方向和垂直方向存在的速度差进一步导致挤压后型材向模具中心处弯曲, 产生弯曲变形。当型心与模具圆心相距 30 mm 时 (图 4c), 水平方向和垂直方向的金属流

动速度分布与图 4a 中的相反。垂直方向金属流动速度更快, 导致挤压后型材向模具外侧弯曲。当模孔型心与模具圆心间距为 20 mm 时 (图 4b), T 形型材水平方向和垂直方向金属流动速度相近, 挤压后型材质量较好。

为了更清楚地展示模孔型心位置对 T 形垂直方向金属流动速度的影响, 进一步对该方向金属流动速度进行了取点分析, 结果如图 5 所示。从图 5 可知, 入口圆角均为 $R3\text{ mm}$ 的 3 组模具在垂直方向的金属流动速度分布存在较大不同。模孔型心与模具圆心相距 10 和 30 mm 的两组模具在垂直方向不同位置处的金属流动速度差异较大。模孔型心与模具圆心相距 20 mm 时 (图 5b) 垂直方向金属流动速度分布最均匀, 整体在 $4500\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动。

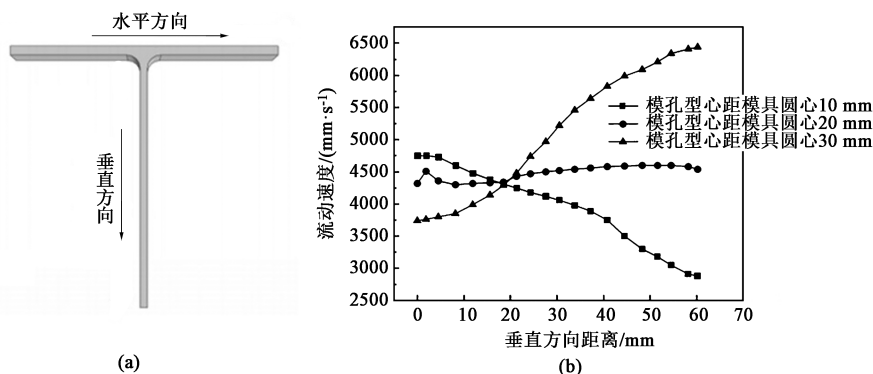


图 5 入口圆角为 $R3\text{ mm}$ 时 T 形模具的水平 and 垂直方向的定义 (a) 和垂直方向金属流动速度分布 (b)

Fig. 5 Definition of horizontal and vertical directions (a) and distribution of metal flow velocity along vertical direction (b) for T-shaped mold with inlet fillet of $R3\text{ mm}$

2.2 入口圆角为 $R5\text{ mm}$ 时模孔位置的影响

图 6 为入口圆角为 $R5\text{ mm}$ 时不同模孔位置的 3 种模具的出口金属流动速度分布图。由图 6 可知, 入口圆角为 $R5\text{ mm}$ 的模拟结果与入口圆角为 $R3\text{ mm}$ 的模拟结果相类似。模孔型心与模具圆心相距 10 和 30 mm 时, T 形模具水平方向和垂直方向存在较大的流速差导

致挤压后型材弯曲; 两心距离为 20 mm 时, 整体金属流动速度均匀, 型材缺陷最小。图 7 为入口圆角为 $R5\text{ mm}$ 时, 不同模孔位置下 T 形模具垂直方向金属流动速度曲线图。对比图 7 和图 5b 可知, 入口圆角增大后, 垂直方向金属流动速度仍保持相似的变化趋势, 即两心距离为 20 mm 时模具的垂直方向金属流动速度最均匀。

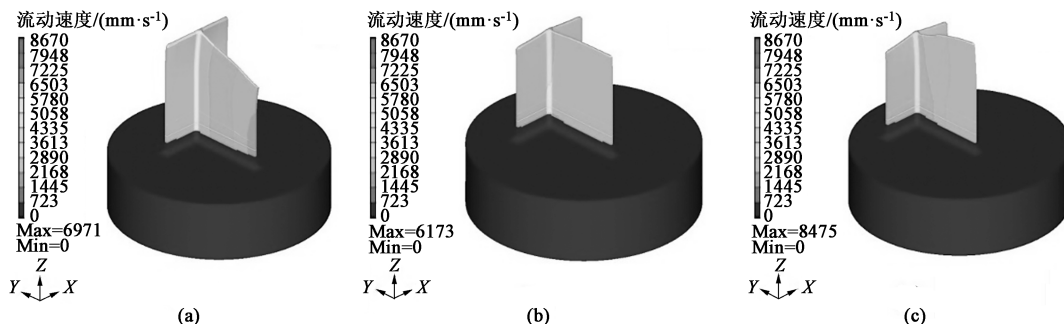


图 6 入口圆角为 $R5\text{ mm}$ 时模具出口金属流动速度分布

(a) 模孔型心距模具圆心 10 mm (b) 模孔型心距模具圆心 20 mm (c) 模孔型心距模具圆心 30 mm

Fig. 6 Distributions of metal flow velocity at mold outlets with inlet fillet of $R5\text{ mm}$

(a) Distance from mold hole center to mold circle center of 10 mm (b) Distance from mold hole center to mold circle center of 20 mm (c) Distance from mold hole center to mold circle center of 30 mm

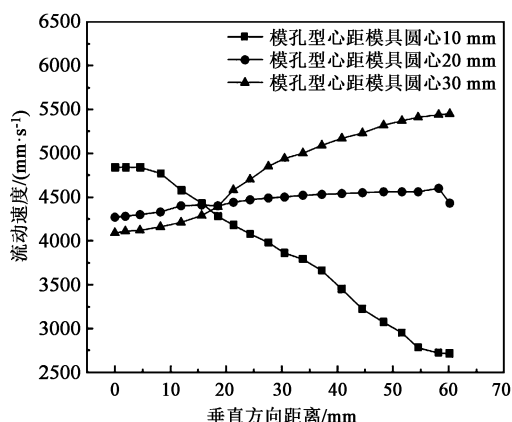


图 7 入口圆角为 $R5$ mm 时 T 形模具垂直方向金属流动速度分布

Fig. 7 Distributions of metal flow velocity along vertical direction for T-shaped molds with inlet fillet of $R5$ mm

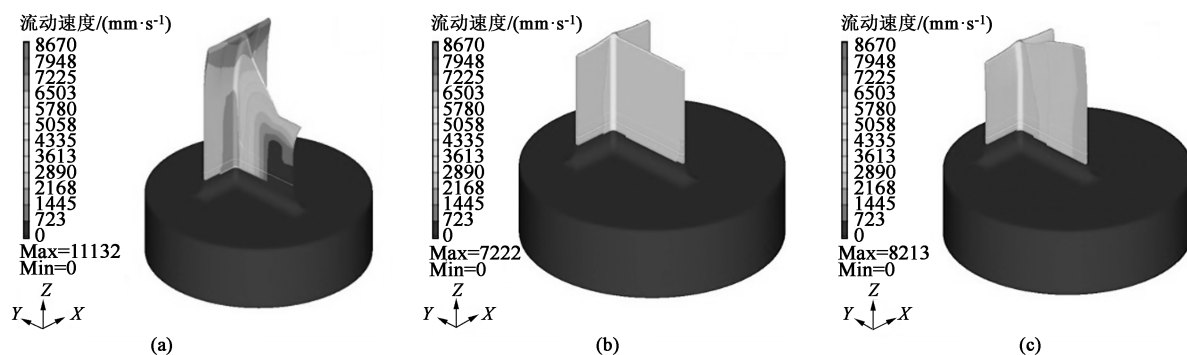


图 8 入口圆角为 $R7$ mm 时模具出口金属流动速度分布

(a) 模孔型心距模具圆心 10 mm (b) 模孔型心距模具圆心 20 mm (c) 模孔型心距模具圆心 30 mm

Fig. 8 Distributions of metal flow velocity at mold outlets with inlet fillet of $R7$ mm

(a) Distance from mold hole center to mold circle center of 10 mm (b) Distance from mold hole center to mold circle center of 20 mm (c) Distance from mold hole center to mold circle center of 30 mm

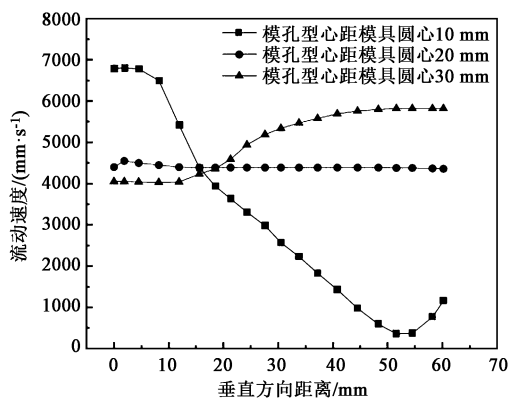


图 9 入口圆角为 $R7$ mm 时 T 形模具垂直方向金属流动速度分布

Fig. 9 Distributions of metal flow velocity along vertical direction for T-shaped molds with inlet fillet of $R7$ mm

2.4 型心与圆心相距 20 mm 时入口圆角的影响

为了进一步确定最优入口圆角, 图 10 对模孔型

2.3 入口圆角为 $R7$ mm 时模孔位置的影响

入口圆角为 $R7$ mm 时, 模拟所得不同模孔位置模具的出口金属流动速度分布云图如图 8 所示。与入口圆角为 $R3$ 和 $R5$ mm 的模拟结果类似, 当入口圆角为 $R7$ mm、两心距离为 20 mm 时, 整体金属流动速度分布最均匀, 得到的型材形状最好。不同 T 形模具垂直方向金属流动速度分布图 (图 9) 进一步证实了这一点。

为了确定挤压后的型材是否能够稳定成形, 针对以上 9 种模具分别计算了其出口金属流动速度 SDV 值, 如表 2 所示。从表 2 可知, 当入口圆角一定时, 模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具的 SDV 值最低, 意味着此模具挤压后的型材成形最稳定。结合前述金属流动速度模拟结果可以确定, 具有不同入口圆角的模具中, 模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具成形效果最佳。

心与模具圆心相距 20 mm, 入口圆角分别为 $R3$ 、 $R5$ 和 $R7$ mm 的 3 种模具的水平和垂直方向金属流动速度进行了对比。从图 10 可以明显看出, 当入口圆角为 $R7$ mm 时, 水平和垂直方向金属流动速度分布更均匀。这一结果与 SDV 值的计算结果相符。在表 2 中, 入口圆角为 $R7$ mm、型心与模具圆心相距 20 mm (记为 $R7-X20$, 其他同理) 的模具的 SDV 值为本次模拟中最小, 为 $32.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。但是从图 10 可以看出, 入口圆角为 $R7$ mm、模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具仍不理想, 水平和垂直方向仍存在金属流动速度差, 最大速度差约为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 需进一步优化。

3 导流槽对挤压过程的影响

为了进一步优化模具, 在入口圆角为 $R7$ mm、模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具基础上增加

表 2 9 种模具挤压后的 SDV 值 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 SDV values of nine kinds of molds after extrusion ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

模具	R3-X10	R3-X20	R3-X30	R5-X10	R5-X20	R5-X30	R7-X10	R7-X20	R7-X30
SDV 值	87.2	38.6	124.5	86.7	41.2	51.8	364.5	32.5	52.6

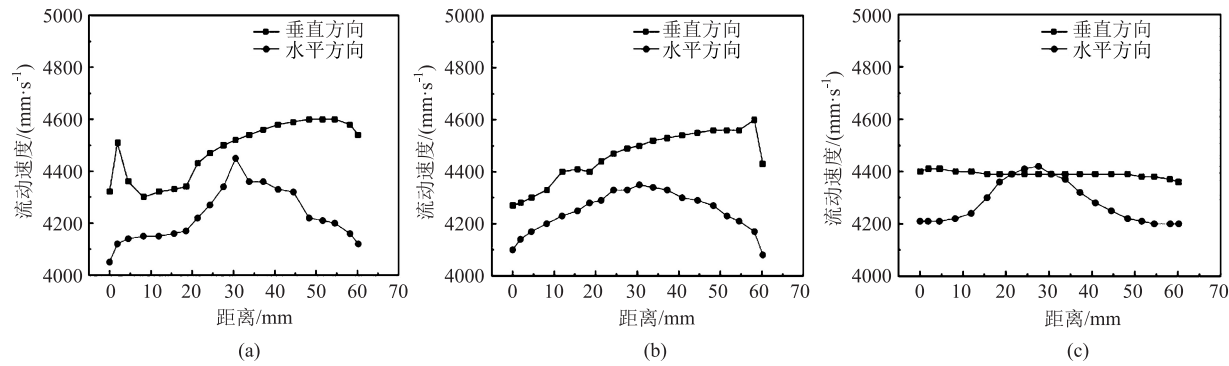


图 10 3 种 T 形模具水平与垂直方向金属流动速度分布

(a) R3-X20 (b) R5-X20 (c) R7-X20

Fig. 10 Distributions of metal flow velocity along horizontal and vertical directions for three kinds of T-shaped molds

了导流槽。通过导流槽的续流作用将模具上产生的突变载荷转变为平缓载荷，对不同形状、不同壁厚处的填充金属进行重新分配，调整填充速度，使金属能够平稳地通过模具^[12-13]，从而达到平衡出口金属流速，优化局部型材形状的目的^[14]。

3.1 导流槽设计变量选择及约束范围

根据模拟结果可知，入口圆角为 R7 mm、模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具挤压出的 T 形型材水平方向金属流动速度略低于垂直方向（图 10c）。本次研究通过调整 T 形水平端上下两部分与导流槽间距 A、B 来改变金属流动速度（图 11）。其中，调整间距 A 可改变 T 形模具水平方向金属的流动速度；调整 B 可改变 T 形模具水平方向与垂直方向交点处金属的流动速度。设计过程中考虑到入口圆角尺寸以及导流槽与模具连接处设置了 2 mm 的倒角，初步由几何形状确定 A 和 B 的取值范围为 10~14 mm。

选择 A、B 两形状因子为设计变量，出口标准速度场偏差 SDV 值为目标函数，按照正交实验的方法^[15]组建各参数的组合方案。针对各因素组合，在其他工艺参数不变的情况下采用有限元模拟的方法获得挤压后型材的 SDV 值。

3.2 模拟结果分析与讨论

表 3 为正交实验得到的 25 组结果。从表 3 可知，模拟后型材大致分为 3 种情况。当 $A = 12 \text{ mm}$ 、 $B = 10 \text{ mm}$ 时，挤压后出口金属流速的 SDV 值最小； $A = 10 \text{ mm}$ 、 $B = 10 \text{ mm}$ 和 $A = 14 \text{ mm}$ 、 $B = 14 \text{ mm}$ 两种设计为 SDV 值最大极限。具有其他导流槽尺寸的模

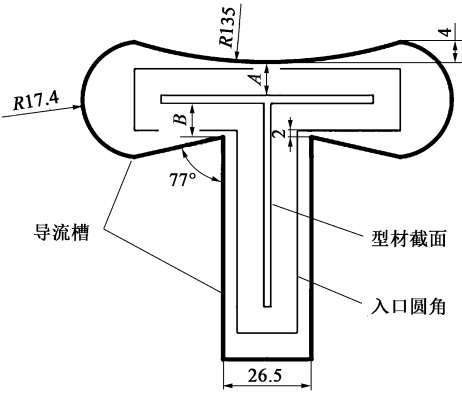


图 11 导流槽及间距 A、B 示意图

Fig. 11 Schematic diagram of guide groove and distances A and B

表 3 具有不同导流槽尺寸模具的 SDV 值

Table 3 SDV values for mold with different dimensions of guide groove

实验号	A/mm	B/mm	$SDV/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	10	10	64.8
2	10	11	53.6
3	10	12	47.2
4	10	13	40.5
5	10	14	35.7
6	11	10	42.4
7	11	11	36.5
8	11	12	31.5
9	11	13	30.8
10	11	14	28.7

续表 3

实验号	A/mm	B/mm	SDV/(mm·s ⁻¹)
11	12	10	13.2
12	12	11	24.2
13	12	12	28.9
14	12	13	31.7
15	12	14	32.4
16	13	10	45.8
17	13	11	53.4
18	13	12	58.7
19	13	13	63.7
20	13	14	82.5
21	14	10	68.4
22	14	11	75.6
23	14	12	78.4
24	14	13	81.9
25	14	14	86.7

具的金属流速 SDV 值均介于最小和最大极限之间。图 12 为具有 3 种极限 SDV 值的模具在压下量相同情况下型材挤出模口的状态图，图 13 为相应的金属流动速度分布图。从图 12 和图 13 可以明显看出，调整导流槽局部尺寸可以控制流入模孔不同位置的金属含量，从而达到控制模具出口金属流动速度，改善挤压后型材质量的目的。

如图 13 所示，当 $A=10\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ 时（图 13a），由于模具中心处尺寸较小，较多金属流入 T 形垂直方向，增大了垂直方向的金属流动速度。水平方向与垂直方向产生的速度差导致型材发生弯曲变形；当 $A=12\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ 时（图 13b），由于整体导流槽水平方向尺寸增大，增加了水平方向的挤压力，进入此区域的金属含量更多，金属可以更好地向 T 形水平方向两端流动，加快了水平方向两端的金属流动速度。当 $A=14\text{ mm}$ 、 $B=14\text{ mm}$ 时（图 13c），导流槽尺寸的进一步增大使得挤压模中心的尺寸远大于

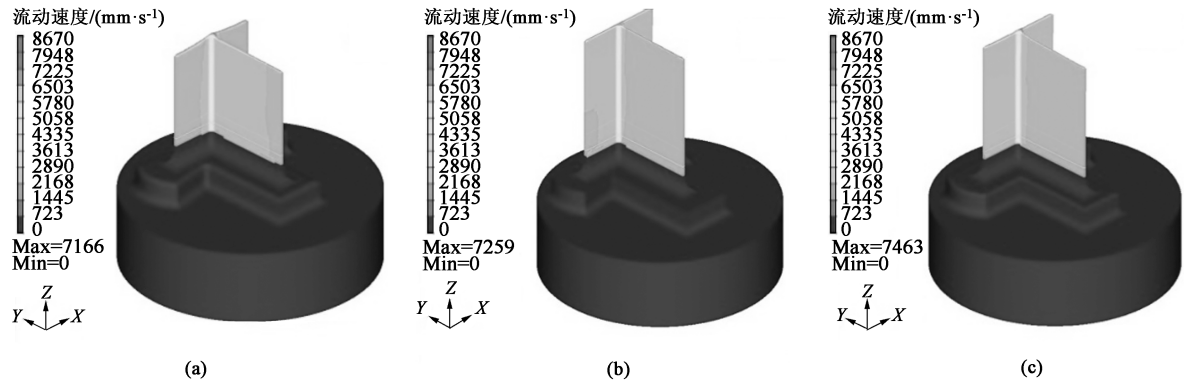


图 12 3 种尺寸导流槽模具挤出的型材状态图

(a) $A=10\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ (b) $A=12\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ (c) $A=14\text{ mm}$ 、 $B=14\text{ mm}$

Fig. 12 State diagrams of profiles extruded by molds with three kinds of dimensions of guide groove

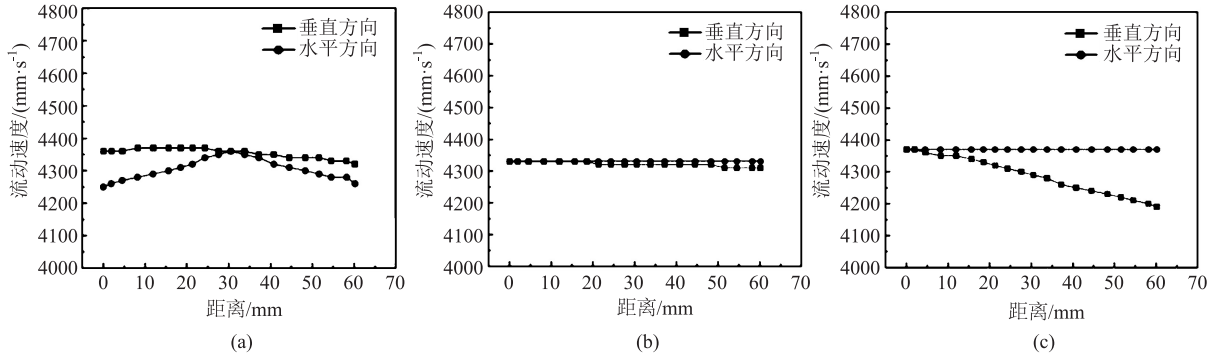


图 13 不同尺寸导流槽下模具的水平与垂直方向金属流动速度

(a) $A=10\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ (b) $A=12\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ (c) $A=14\text{ mm}$ 、 $B=14\text{ mm}$

Fig. 13 Metal flow velocity along horizontal and vertical directions for molds with different dimensions of guide groove

垂直方向，导致模具出口处 T 形水平方向的金属流动速度大于垂直方向，型材发生变形。分析图 13 的

3 种情况并结合 SDV 值可知， $A=12\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ 的导流槽为最佳。该尺寸导流槽的加入可以进一步

平衡模具出口的金属流动速度, 优化局部型材形状。

4 结论

(1) 采用单因素法研究了模具入口圆角和模孔位置对 T 形薄壁型材挤压过程的影响。研究发现, 模具入口圆角和模孔位置对挤压后型材出口金属流动速度分布和 *SDV* 值均有显著影响。当入口圆角一定时 (分别为 *R3*、*R5* 和 *R7* mm), 模孔型心与模具圆心相距 20 mm 的模具中金属流动速度分布最均匀, *SDV* 值最低。而当模孔位置一定时 (型心与模具圆心相距 20 mm), 入口圆角为 *R7* mm 的模具中金属流动速度分布最均匀。因此, 在具有不同入口圆角和模孔位置的 9 组模具中, 最优模具结构参数为: 入口圆角为 *R7* mm、模孔型心距模具圆心 20 mm。但此模具的水平方向和垂直方向金属流动速度仍存在差别, 需进行下一步优化。

(2) 通过增加导流槽对入口圆角为 *R7* mm、模孔型心距模具圆心 20 mm 的模具进行了进一步的优化。设计了具有不同导流槽尺寸的 25 组正交实验, 模拟研究了导流槽尺寸对挤压后出口的金属流动速度的影响。模拟结果表明, 导流槽尺寸可以改变流入模孔不同位置的金属含量, 从而改变模具出口的金属流动速度。其中, 较大和较小的导流槽均会增大 T 形模具水平和垂直方向的金属流动速度差异, 导致挤压出的型材弯曲变形。最优导流槽尺寸为 *A* = 12 mm、*B* = 10 mm。具有该尺寸导流槽的模具的 *SDV* 值最低, 挤压出的型材质量最佳。

参考文献:

- [1] 同晓乐, 张明玉, 于成泉, 等. 不同轧制厚度 TC4 钛合金板材的组织与性能 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 153-159.
Tong X L, Zhang M Y, Yu C Q, et al. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy sheets with different rolling thickness [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 153-159.
- [2] 李军兆, 孙清洁, 于航. 高性能钛合金先进成形技术研究现状 [J]. 钢铁钒钛, 2021, 42 (6): 17-27.
Li J Z, Sun Q J, Yu H. Current research status of advanced forming technology for high-performance titanium alloys [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42 (6): 17-27.
- [3] 高妍, 徐建伟, 王伟. TC4 钛合金型材挤压过程有限元模拟 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (13): 187-189, 193.
Gao Y, Xu J W, Wang W. Finite element simulation of extrusion process of TC4 titanium alloy profile [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (13): 187-189, 193.
- [4] Medvedev A E, Bevacqua A, Molotnikov A, et al. Innovative aluminium extrusion: Increased productivity through simulation [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 469-474.
- [5] Damodaran D, Shivpuri R. Prediction and control of part distortion during the hot extrusion of titanium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150 (1-2): 70-75.
- [6] Bergamini R, Mapelli C, Venturini R. Hot extrusion experiments performed on Ti-6Al-4V for the production of special cross sections [J]. Metallurgical Science and Technology, 2013, 21 (2): 18-25.
- [7] Chen D C, You C Y, Nian F L, et al. Using the Taguchi method and finite element method to analyze a robust new design for titanium alloy prick hole extrusion [J]. Procedia Engineering, 2011, 10 (7): 82-87.
- [8] Shin T J, Lee Y H, Yeom J T, et al. Process optimal design in non-isothermal backward extrusion of a titanium alloy by the finite element method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194 (36-38): 3838-3869.
- [9] 刘莹莹, 王庆娟. 金属挤压、拉拔工艺及工模具设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
Liu Y Y, Wang Q J. Metal Extrusion, Drawing and Die Design [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [10] Lu X, Zhou Y F, Xing X L, et al. Failure analysis of hot extrusion die based on dimensional metrology, micro-characterization and numerical simulation-A case study of Ti alloy parts [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 73: 113-128.
- [11] Chen Z Z, Lou Z L, Ruan X Y. Finite volume simulation and mould optimization of aluminum profile extrusion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190 (1-3): 382-386.
- [12] 黄翔, 陈文亮, 谢洪典. 铝型材挤压模工作带长度和模孔配置的优化设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28 (2): 247-252.
Huang X, Chen W L, Xie H D. Computer aided optimum design of die bearing length and layout for aluminium profile extrusion [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1996, 28 (2): 247-252.
- [13] Xue X, Vincze G, Pereira A B, et al. Role of die structures on metal flow balance in multi-output porthole extrusion of thin-walled profile [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 225-231.
- [14] 徐磊, 赵国群, 张存生, 等. 多腔壁板铝型材挤压过程数值模拟及模具优化 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (22): 61-68.
Xu L, Zhao G Q, Zhang C S, et al. Numerical simulation of extrusion process and die optimization for aluminum multi-cavity profile [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (22): 61-68.
- [15] 林高用, 周佳, 张永宁, 等. 铝型材挤压模具导流孔结构优化 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38 (2): 225-231.
Lin G Y, Zhou J, Zhang Y N, et al. Optimization of deflector hole for aluminium profile extrusion die [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38 (2): 225-231.