

特种成形

## 某铝合金 T 型材双模孔反向挤压变形分析及模孔位置优化

吕正风<sup>1</sup>, 李烨旭<sup>2</sup>, 孙有政<sup>1</sup>, 曹善鹏<sup>1</sup>, 马新武<sup>2</sup>, 赵国群<sup>2</sup>

(1. 山东南山铝业股份有限公司, 山东 龙口 264000; 2. 山东大学 材料液固结构与加工教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

**摘要:** 双模孔反向挤压过程中, 模孔布局对挤压型材的变形及质量具有重要影响。对某铝合金 T 型材双模孔反向挤压过程进行了数值模拟, 分析了不同模孔布局对挤压型材变形及其均匀性的影响规律, 获得了平模挤压两模孔的合理布局方案。并针对平模挤压两模孔之间存在的等效应变集中问题, 提出了一种在平模挤压两模孔之间设置劈料台的方法, 对比分析了设置劈料台前型材的等效应变、温度分布和流速分布等。结果表明, 模孔布局对挤压型材的等效应变分布的影响明显, 合理的模孔布局可有效提高型材的变形均匀性, 具有劈料台的挤压模具能够显著改善型材的等效应变集中问题。

**关键词:** 双模孔; 反向挤压; T 型材; 模孔布局; 劈料台

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.020

**中图分类号:** TG375

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0144-08

## Deformation analysis and mold hole position optimization on double mold hole reverse extrusion for aluminum alloy T profile

Lyu Zhengfeng<sup>1</sup>, Li Yexu<sup>2</sup>, Sun Youzheng<sup>1</sup>, Cao Shanpeng<sup>1</sup>, Ma Xinwu<sup>2</sup>, Zhao Guoqun<sup>2</sup>

(1. Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Longkou 264000, China; 2. Key Laboratory for Liquid-Solid Structure Evolution & Processing Materials Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** During the process of reverse extrusion with double mold holes, the layout of mold hole has an important impact on the deformation and quality of extruded profiles. Therefore, the numerical simulation of reverse extrusion process with double mold holes for aluminum alloy T profile was carried out, and the influence laws of different mold hole layouts on the deformation and its uniformity of extruded profile were analyzed to obtain a reasonable layout plan for double mold holes in flat mold extrusion. Then, aiming at the problem of equivalent strain concentration between the double mold holes in the flat mold extrusion, a method of setting a cleaver divider between the double mold holes in the flat die extrusion was proposed, and the equivalent strain, temperature distribution and velocity distribution of profiles before and after setting the cleaver divider were compared and analyzed. The results show that the mold hole layout has a significant effect on the equivalent strain distribution of extruded profile. Thus, a reasonable mold hole layout can effectively improve the deformation uniformity of profile, and the extrusion mold with cleaver divider can significantly improve the problem of equivalent strain concentration of profile.

**Key words:** double mold holes; reverse extrusion; T profile; mold hole layout; cleaver divider

世界能源问题愈演愈烈, 轻量化已成为社会可持续发展的举措。铝合金具有强度高、密度小、耐腐蚀性能优异等优点, 在航空航天<sup>[1]</sup>、交通运输<sup>[2]</sup>、建筑装饰等领域得到广泛应用。热挤压法是生产铝合金构件的重要方法之一<sup>[3]</sup>, 一般分为正挤

压、反挤压和侧向挤压。反挤压的金属流动相对均匀, 变形抗力小, 由于挤压过程中金属温升小, 故可提高挤压速度, 且制品表面上不易出现裂纹<sup>[4]</sup>。但采用多模孔反向挤压铝合金型材时, 模孔布局对挤压型材的变形及质量具有重要影响。研究模孔布局对挤压型材变形及其均匀性的影响规律, 对于控制型材变形均匀性和提高型材的横向性能具有重要作用。

在多模孔铝合金挤压技术研究方面, Zhang C S 等<sup>[5]</sup>研究了铝合金管的多模孔分流挤压过程, 设计了不同的模孔位置, 揭示了模孔位置对变形均匀性和焊合质量的影响规律。Fang G 等<sup>[6]</sup>研究了 V 型材的多模孔挤压过程, 通过设计不同的模具结构, 获

收稿日期: 2022-05-04; 修订日期: 2022-08-12

基金项目: 山东省重点研发计划 (重大科技创新工程) (2021 ZLGX01)

作者简介: 李烨旭 (1998-), 男, 博士研究生

E-mail: 202020483@mail.sdu.edu.cn

通信作者: 赵国群 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhaogq@sdu.edu.cn

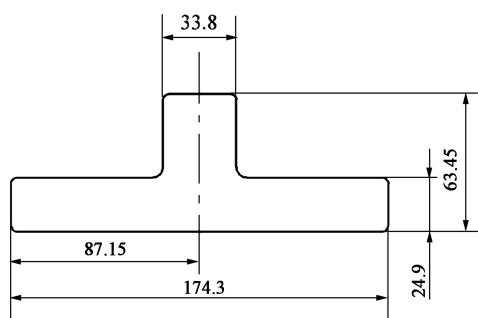
得了相对均匀的流速分布。Chen F K 等<sup>[7]</sup>研究了铝合金管的多模孔挤压过程, 通过调节模孔的位置, 提高了模孔出口处材料流动速度的均匀性。Das R 等<sup>[8]</sup>研究了不同模具结构对挤压载荷、等效应变和挤出产品长度的影响, 获得了更为均匀的等效应变分布。此外, 还有许多学者<sup>[9-13]</sup>研究了单模孔挤压时模具结构对变形均匀性的影响规律。

对于航空铝合金挤压结构件, 不仅对挤压件的纵向(挤压方向)性能具有明确要求, 而且还对挤压件的横向性能具有要求, 但双模孔或多模孔挤压时, 挤压件的横向变形量相对较小, 且变形往往不均匀, 势必影响挤压件截面上的变形和组织均匀性, 乃至横向性能。因此, 研究双模孔反向挤压型材的变形均匀性具有重要意义。本文针对某铝合金 T 型

材双模孔反向挤压过程, 研究了模孔布局对材料变形的影响, 对模孔位置进行了优化设计, 并在此基础上提出了一种在两模孔之间设置劈料台的方法, 显著提高了挤压件的变形均匀性。

## 1 双模孔布局方案

图 1a 为所研究的 T 型材的截面形状与尺寸, 综合考虑挤压筒的大小、型材的形状与尺寸及生产效率, 采用双模孔布局的模具在 150 MN 反向挤压机上挤压, 一次挤出两个型材, 实际挤出的型材如图 1b 所示。在实际挤压过程中, 认为模孔布局对于型材成形质量具有重要影响, 为此, 本文系统研究了不同模孔布局对挤压型材变形及其均匀性的影响规律。



(a)



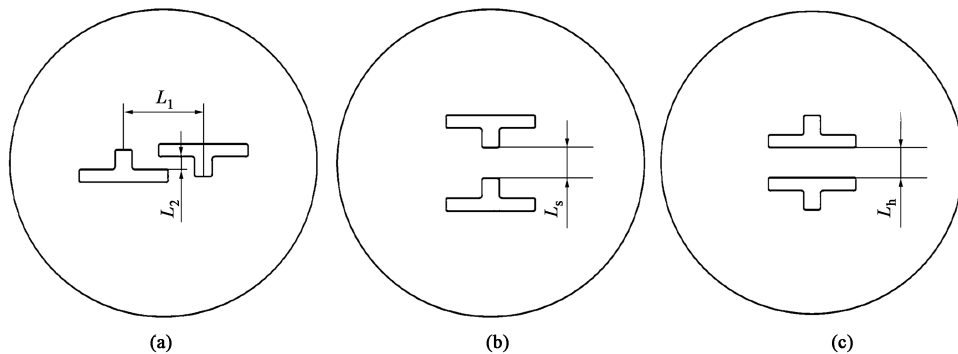
(b)

图 1 T 型材截面形状与尺寸 (a) 及产品图片 (b)

Fig. 1 Section shape and dimensions (a) and product picture (b) for T profile

双模孔的布置遵循中心对称原则, 考虑型材的几何形状及挤压筒直径, 设置了 3 种双模孔布局方案, 包括左右布局、短边相对的上下布局、长边相对的上下布局, 如图 2 所示。其中, 左右布局时, 双模孔之间的距离由  $L_1$  和  $L_2$  控制,  $L_1$  为两模孔中

心线的距离,  $L_2$  为两模孔上下短边间的距离; 短边相对上下布局和长边相对上下布局时, 双模孔之间的距离分别由  $L_s$  和  $L_h$  来控制,  $L_s$  为短边相对上下布局中两模孔短边的距离,  $L_h$  为长边相对上下布局中两模孔长边的距离。



(a)

(b)

(c)

图 2 模孔布局

(a) 左右布局 (b) 短边相对上下布局 (c) 长边相对上下布局

Fig. 2 Mold hole layouts

(a) Left and right layout (b) Top-bottom layout with short sides facing each other (c) Top-bottom layout with long sides facing each other

选择不同的  $L_1$  和  $L_2$  组合和不同的  $L_s$  和  $L_h$ , 研究不同模孔布局对挤压型材变形的影响。 $L_1$  和  $L_2$  越大, 即图 2a 中的模孔距离越大, 则模孔距离挤压筒的内壁就越近, 根据模具应尽量紧凑和靠近挤压筒中心的设计原则, 模孔距离挤压筒内壁应不小于 60 mm, 否则挤压坯料表层金属容易流入型材, 进而影响型材的组织与性能。此外,  $L_1$  和  $L_2$  越小, 即双模孔之间的距离越小, 材料在分别流入不同的模孔时会使金属产生剧烈变形, 从而影响型材变形及组织性能的均匀性。考虑到模具模套的装配方式,  $L_1$  和  $L_2$  的变化范围分别为:  $120\text{ mm} < L_1 < 195\text{ mm}$ ,  $20\text{ mm} < L_2 < 90\text{ mm}$ 。同理,  $L_s$  和  $L_h$  的选择范围分别为:  $30\text{ mm} < L_s < 200\text{ mm}$ ,  $30\text{ mm} < L_h < 200\text{ mm}$ 。为研究图 2 所示 3 种布局方案中不同模孔之间的距离(模孔布局)对材料变形的影响, 表 1 给出了 7 种不同的模孔布局。将挤压模具的工作带设计成不等长工作带, 其中 3 个端部位置处的工作带长度为 4 mm, 其余位置的工作带长度为 6 mm, 模具设置三级空刀。

表 1 7 种不同的模孔布局 (mm)

Table 1 Seven kinds of different mold hole layouts (mm)							
双模孔 的布局 尺寸	左右布局			短边相对上下 布局		长边相对上下 布局	
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
$L_1/L_2$	156/25	186/25	186/75	—	—	—	—
$L_s$	—	—	—	30	120	—	—
$L_h$	—	—	—	—	—	30	120

## 2 模孔布局对挤压型材变形的影响规律

针对表 1 所示的 7 种不同的模孔布局, 基于 Deform 模拟软件, 分别建立了不同模孔布局的挤压过程的数值模拟模型, 图 3 给出了模孔左右布局的挤压型材的数值模拟模型。对于 7 种不同的模孔布局, 选择材料为 2024 铝合金, 坯料直径为  $\Phi 598\text{ mm}$ , 坯料长度为 500 mm, 挤压速度设置为  $1.2\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 模具及坯料的加热温度为  $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 挤压筒的加热温度为  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 传热系数为  $11\text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ , 摩擦类型设为剪切摩擦, 其中剪切摩擦因子选择为  $0.4^{[14]}$ 。

### 2.1 等效应变分布

图 4 为不同模孔布局对应的模孔出口处型材截面上的等效应变分布。从图 4 可以看出, 受模孔排

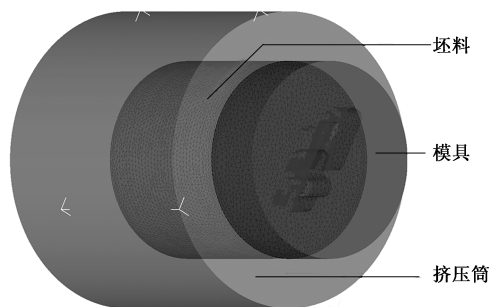


图 3 模孔左右布局的型材挤压过程数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model of profile extrusion process with left and right layout for mold holes

布方式的影响, 图 4a、图 4d 和图 4f 所示的型材截面上的等效应变极不均匀, 尤其是在两个模孔挤出型材相互靠近的区域, 其型材截面上的等效应变较大, 说明这些区域存在明显的等效应变集中现象, 这 3 种情况分别对应模孔布局方案 1、方案 4 和方案 6。

对于左右模孔布局, 方案 2 (图 4b) 是在方案 1 (图 4a) 的基础上增加了两模孔的横向距离  $L_1$ , 由图 4b 可看出, 等效应变较大区域明显减少, 但在两个模孔挤出型材相互靠近的位置处, 型材表面仍存在部分相对较大的等效应变区域。方案 3 (图 4c) 是在方案 2 (图 4b) 的基础上增加了两模孔上下短边角的距离  $L_2$ , 从图 4c 可看出, 仅有两个模孔挤出型材相互靠近的位置处, 型材表层存在很小的等效应变集中区域, 说明模孔布局方案 3 有效改善了型材截面上的等效应变集中问题。因此, 对于左右模孔布局的情况, 增加模孔间的距离可明显改善挤出型材截面上的等效应变的均匀性。

对于上下模孔布局的情况, 模孔布局方案 5 (图 4e) 与方案 4 (图 4d) 相比, 增加了两模孔短边间的距离  $L_h$ , 由图 4e 可看出, 型材截面上的等效应变集中现象明显改善, 但在两个模孔挤出型材的相互靠近区域, 型材表面仍存在一定的等效应变集中现象。模孔布局方案 7 (图 4g) 与方案 6 (图 4f) 相比, 增加了两模孔长边的距离  $L_s$ , 由图 4g 看出, 等效应变集中区域基本消失, 等效应变集中现象明显改善。上述情况表明, 对于上下模孔布局的情况, 特别是长边相对的上下模孔布局, 增加模孔长边间的距离可明显改善两模孔挤出型材相互靠近区域的等效应变集中现象。

为进一步分析不同模孔布局对挤压型材变形的影响, 提取并分析了型材截面上的等效应变数据, 如表 2 所示。从表 2 中同样可发现, 无论是左右模

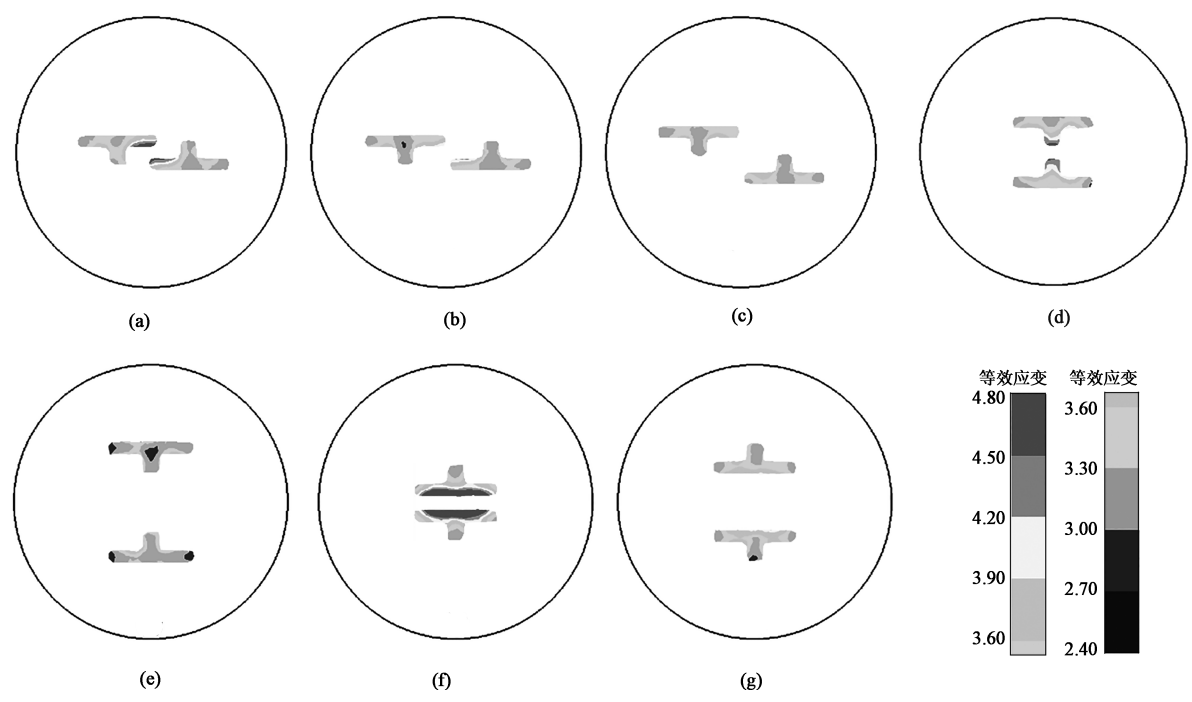


图 4 不同模孔布局下挤压型材截面上的等效应变分布  
(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3 (d) 方案 4 (e) 方案 5 (f) 方案 6 (g) 方案 7  
Fig. 4 Equivalent strain distributions on extruded profile section under different mold hole layouts  
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3 (d) Scheme 4 (e) Scheme 5 (f) Scheme 6 (g) Scheme 7

表 2 挤压型材截面等效应变分布数据

Table 2 Equivalent strain distribution data of extruded profile sections					
模孔布局	最大值 Max	最小值 Min	Max-Min	平均值 Avg	均方差 S. D.
方案 1	5.02	3.00	2.02	3.55	0.420
方案 2	4.29	2.95	1.34	3.42	0.294
方案 3	3.99	2.98	1.01	3.37	0.213
方案 4	5.71	3.00	2.71	4.07	0.722
方案 5	4.20	2.96	1.24	3.44	0.259
方案 6	4.73	2.97	1.76	3.61	0.413
方案 7	4.06	2.76	1.30	3.25	0.220

孔布局还是上下模孔布局，随两模孔间距离的增加，等效应变最大值明显减小，最大值和最小值的差值及其均方差均明显减小。由此说明，两模孔间距离较小时，模孔间金属变形剧烈，易出现等效应变集中现象，随着两模孔间距离的增加，等效应变集中现象逐渐得以改善。

综合考虑图 4 所示的等效应变分布及表 2 所示的分析数据，模孔布局方案 3 对应的等效应变最大值与最小值差值及其均方差最小，由此可确定模孔

布局方案 3 为最佳模孔排布方案。

2.2 温度分布

以模孔布局方案 1、2 和 3 为例，分析了不同模孔布局对型材温度分布的影响，结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，挤压成形过程中最高温度出现在型材工作带处，此处金属因变形最为剧烈而产热较多。模孔布局方案 1 对应的两型材存在较明显的温度不均匀性，两型材靠近区域的温度最高，达到 468 ℃，而模孔出口处型材截面上温度均方差为 3.58 ℃；模孔布局方案 2 的最高温度约为 461 ℃，而模孔出口处型材截面上温度均方差降至 2.30 ℃；模孔布局方案 3 的最高温度仍约为 461 ℃，而模孔出口处型材截面上的温度均方差进一步降低，为 1.98 ℃。这说明随着模孔间距离的增加，型材截面上的温度均匀性不断改善，且两型材间的最高温度不断降低，但模孔间距离增大到一定值后，继续增加模孔间距离对型材最高温度的影响不明显。

2.3 流速分布

以模孔布局方案 1、2 和 3 为例，分析不同模孔布局对型材流速分布的影响，结果如图 6 所示。从图 6 中可看出：模孔布局方案 1 对应的两型材存在明显的流速分布不均匀性，型材靠近中心一侧的流速较快，而远离中心一侧的流速较慢，最大流速出



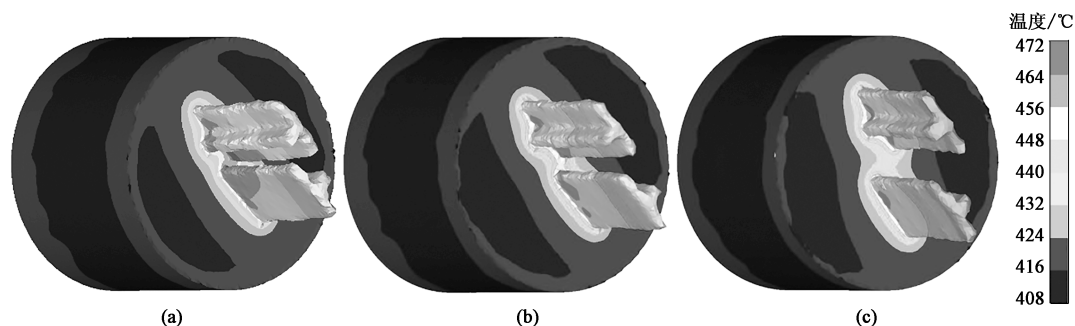


图 5 不同模孔布局下挤压型材温度分布

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 5 Temperature distributions of extruded profile under different mold hole layouts

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

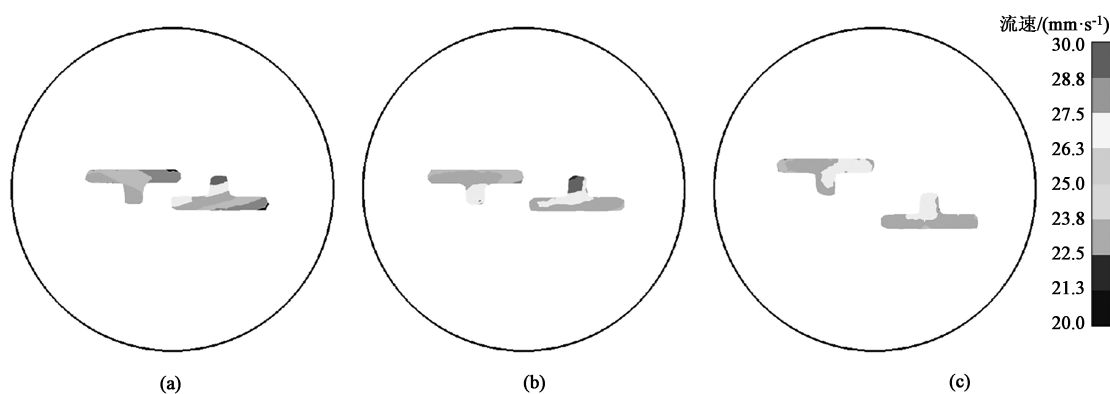


图 6 不同模孔布局下挤压型材截面上的流速分布

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 6 Velocity distributions on extruded profile sections under different mold hole layouts

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

现在“T”字头部区域；而模孔布局方案 2 和方案 3 增加了两模孔间的距离，使得型材截面上的流速不均匀性逐渐改善。为进一步分析不同模孔布局对型材流速的影响，提取并分析了型材截面上的流速分布数据，如表 3 所示。从表 3 中同样可发现，对于左右模孔布局，随两模孔间距离增加，型材截面上流速分布均方差明显减小，而平均值基本不变，说明增加两模孔间的距离改善了型材截面上的流速分布不均现象。

表 3 挤压型材截面流速分布对比 ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )Table 3 Comparison of velocity distributions on extruded profile sections ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

模孔布局	最大值 $Max$	最小值 $Min$	平均值 $Avg$	均方差 $S. D.$
方案 1	28.5	22.0	24.8	1.420
方案 2	28.9	22.7	25.8	1.060
方案 3	27.1	22.6	25.9	0.706

### 3 劈料台对铝型材变形的影响规律

上述分析表明，两模孔间两型材靠近区域易出现等效应变分布不均匀和集中现象，这会影响型材截面上的变形和组织均匀性。为解决这一问题，提出了一种在两模孔中间区域增加劈料台的分流模具结构方案，如图 7 所示，劈料台的作用是在材料进入模具前预先分流。采用这种模具结构，建立挤压过程的数值模拟模型，模拟得到了如图 8b 和图 8d 所示的型材截面上的等效应变分布，为进行比较，图 8a 和图 8c 分别对应给出了无劈料台模具的模拟结果。

从图 8 可以看出，对于模孔布局方案 1 和方案 3，具有劈料台的模具结构均明显改善了两型材靠近区域的等效应变集中现象。对于模孔布局方案 1，对图 8b 所示截面上的等效应变数据进行分析，设置劈料台的模具对应的型材截面上的等效应变平均值为 3.38，最大值和最小值分别为 4.12 和 2.92，均

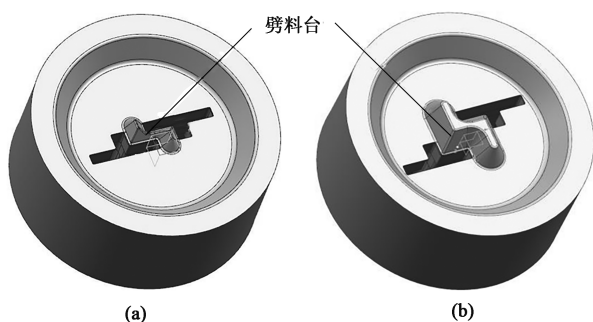


图7 设置劈料台的模具结构三维图

(a) 方案1 (b) 方案3

Fig. 7 3D diagrams of mold structure with cleaver divider

(a) Scheme 1 (b) Scheme 3

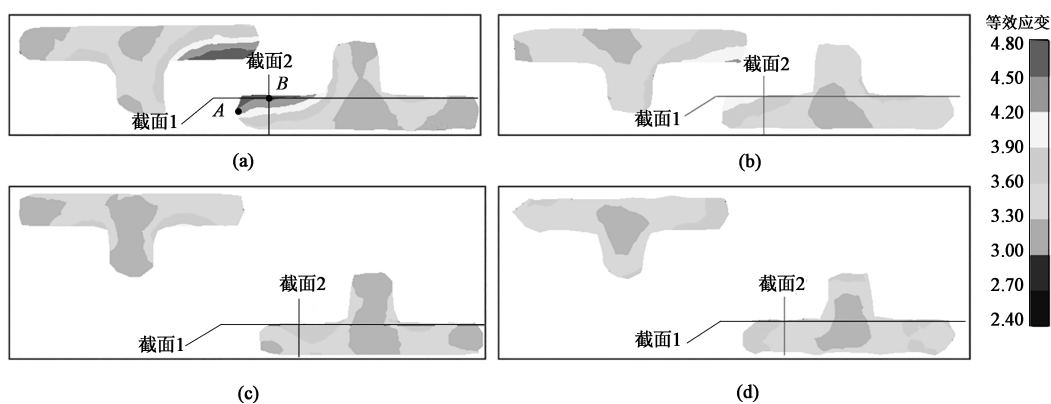


图8 型材截面的等效应变分布

(a) 方案1 (b) 方案1 设置劈料台 (c) 方案3 (d) 方案3 设置劈料台

Fig. 8 Equivalent strain distributions of profile sections

(a) Scheme 1 (b) Scheme 1 with cleaver divider (c) Scheme 3 (d) Scheme 3 with cleaver divider

为进一步分析型材截面上的等效应变分布, 图9给出了图8中截面1和截面2上的等效应变分布对比, 其中A点为模孔长边最左端的顶点, B点为截面2与模孔长边上表面的交点。对于模孔布局方案1, 从图9a和图9b看出, 设置劈料台的模具对应的两个截面上的等效应变最大值明显减小, 等效应变最小值基本相近, 最大值与最小值的差值明显减小。对于截面1, 设置劈料台前后对应的等效应变的均方差分别为0.610和0.265; 对于截面2, 设置劈料台前后对应的等效应变的均方差分别为0.383和0.151。可见, 设置劈料台后截面1和截面2上的等效应变均方差显著减小, 说明设置劈料台的模具明显提高了型材的等效应变分布均匀性。对于模孔布局方案3, 从图9c和图9d看出, 设置劈料台后的型材的等效应变均匀性有所提高, 劈料台明显减小了型材截面上的最大等效应变值, 最小等效应变值与无劈料台的情况相近, 设置劈料台后的型材的等效应变最大值与最小值的差值明显减小。对于截面

方差为0.216, 对比表2中无劈料台的模孔布局方案1, 其等效应变最大值与最小值的差值明显减小, 且均方差降至0.216, 说明设置劈料台后明显提高了型材的等效应变分布均匀性。同样, 对于模孔布局方案3, 通过对图8d所示截面上的等效应变数据分析可知, 设置劈料台的模具对应的型材截面上的等效应变的平均值为3.47, 最大值和最小值分别为3.81和3.05, 均方差为0.158, 对比表2中无劈料台的模孔布局方案3, 其等效应变最大值与最小值的差值明显减小, 且均方差降至0.158, 也说明设置劈料台后明显提高了型材的等效应变分布均匀性。

1, 设置劈料台前后对应的等效应变的均方差分别为0.220和0.152; 对于截面2, 设置劈料台前后对应的等效应变的均方差分别为0.134和0.023。可见, 设置劈料台后截面1和截面2上的等效应变均方差也显著减小。

由上述分析可知, 设置劈料台可明显降低两型材间的等效应变集中现象, 这是因为劈料台使两模孔的金属在进入模孔之前被提前分流, 使流动阻力减少, 局部变形变小, 被分流的金属再被挤入模孔继续变形, 这就明显减小了两型材间金属在进入模孔前的变形程度。

从图5a可知, 未设置劈料台的模孔布局方案1对应的两型材靠近区域的温度分布不均匀, 温升现象较严重, 最高和最低温度分别为468和449℃, 而均方差为3.58℃。图10a给出了设置劈料台的模孔布局方案1对应的型材的温度分布。从图10a中看出, 两型材靠近区域仍为温度最高区域, 且仍存在一定的温度不均匀性, 设置劈料

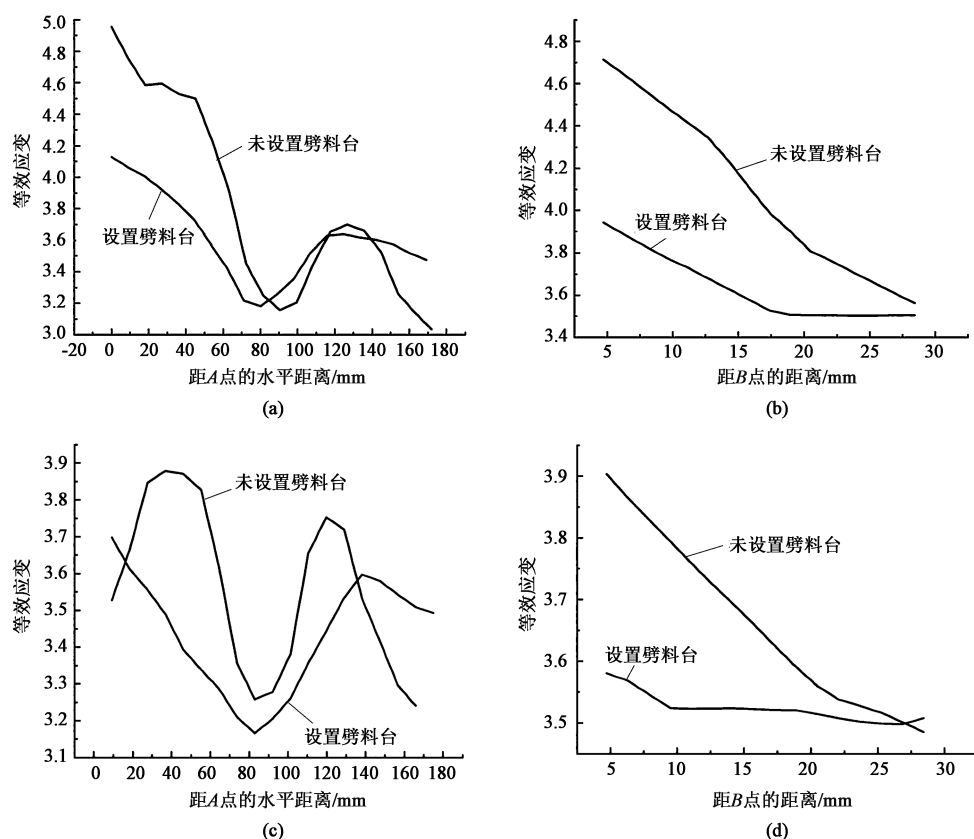


图9 设置劈料台前后型材不同截面的等效应变分布对比

(a) 方案1, 截面1 (b) 方案1, 截面2 (c) 方案3, 截面1 (d) 方案3, 截面2

Fig. 9 Comparison of equivalent strain distributions on different profile sections before and after setting cleaver divider

(a) Scheme 1, section 1 (b) Scheme 1, section 2 (c) Scheme 3, section 1 (d) Scheme 3, section 2

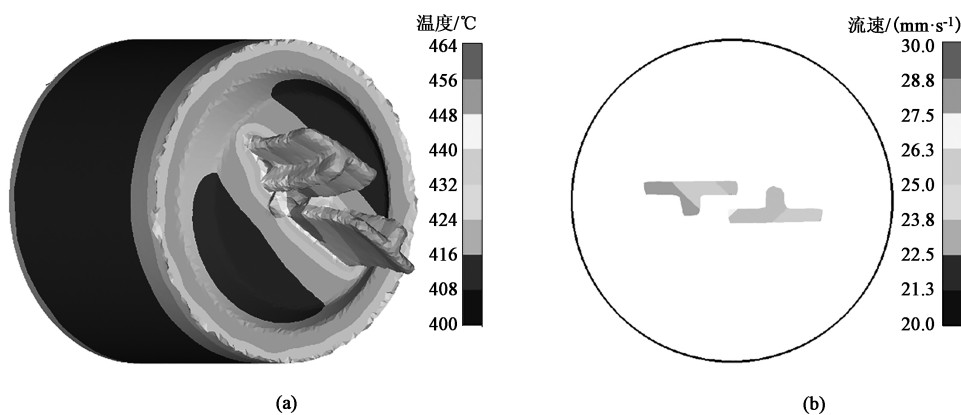


图10 设置劈料台后模孔布局方案1对应的型材温度分布 (a) 和型材截面上的流速分布 (b)

Fig. 10 Temperature distributions of profile (a) and velocity distribution on profile section

(b) corresponding to mold hole layout scheme 1 after setting cleaver divider

台后型材的最高温度和最低温度分别降为 459 和 442  $^{\circ}\text{C}$ , 而均方差降为 3.39  $^{\circ}\text{C}$ , 最高与最低温度间的差值与无劈料台的情况相近, 但均方差有所减小, 说明温度分布均匀性有所提高。

从图 6a 和表 3 可知, 未设置劈料台的模孔布局方案 1 对应的型材截面上的流速分布均方差为

1.420  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 存在明显的流速不均匀现象。图 10b 给出了设置劈料台的模孔布局方案 1 对应的型材截面上的流速分布。从图 10b 中可看出, 尽管型材在靠近模具中心一侧的流速仍然相对较快, 但型材截面上的最快流速得以明显降低, 降至 26.4  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最慢流速和平均流速基本未变, 分

别为 22.5 和 24.6 mm · s<sup>-1</sup>, 流速均方差得以明显降低, 降至 0.973 mm · s<sup>-1</sup>, 说明设置劈料台明显改善型材截面上的流速不均现象。

## 4 结语

模孔排布方式对型材等效应变分布的影响明显, 两模孔间距离较小时, 型材截面存在明显的等效应变集中现象, 增大模孔间距离可有效提高型材截面上的等效应变分布均匀性; 型材截面上存在温度和流速不均匀性, 随着模孔间距离增加, 型材截面上的温度和流速均匀性得以改善; 在两模孔间设置劈料台可显著提高型材截面上的等效应变均匀性, 同时也对型材截面上的温度和流速均匀性起到一定作用。提高型材尤其是航空用铝合金型材截面上的变形与温度均匀性对于改善型材的横向性能和减小型材的各向异性具有重要作用。

### 参考文献:

- [1] 刘莹莹, 李洁洁, 杨健, 等. 孔挤压强化对 2A97 铝锂合金耳片疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (9): 1254-1260.  
Liu Y Y, Li J J, Yang J, et al. Hole expansion strengthening on fatigue properties of 2A97 Al-Li alloy lugs [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (9): 1254-1260.
- [2] 朱上, 李志辉, 闫丽珍, 等. 预时效对汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金烘烤硬化性的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 281-288.  
Zhu S, Li Z H, Yan L Z, et al. Bake-hardening response in a novel Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy with pre-aging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 281-288.
- [3] Zhang C S, Wang C X, Zhang Q Y, et al. Influence of extrusion parameters on microstructure, texture, and second-phase particles in an Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 323-334.
- [4] 吕洪伟, 杜连欢, 谢洪博, 等. 7075 铝合金反挤压棒材生产工艺研究 [J]. 铝加工, 2020, (2): 50-52.  
Lyu H W, Du L H, Xie H B, et al. Study on production process of 7075 aluminum alloy reverse extrusion bar [J]. Aluminium Fabrication, 2020, (2): 50-52.
- [5] Zhang C S, Zhao G Q, Chen H, et al. Investigation on effects of die orifice layout on three-hole porthole extrusion of aluminum alloy 6063 tubes [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22 (5): 1223-1232.
- [6] Fang G, Zhou J, Duszczek J. FEM simulation of aluminium extrusion through two-hole multi-step pocket dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (4): 1891-1900.
- [7] Chen F K, Chuang W C, Torng S. Finite element analysis of multi-hole extrusion of aluminum-alloy tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201 (1-3): 150-155.
- [8] Das R, Sarmah A, Lakshmi D, et al. A finite element analysis on the effect of location of holes, die pockets and extrusion speed in multi-hole extrusion process [J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1247-1253.
- [9] 喻俊荃, 赵国群, 张存生, 等. 阻流块对薄壁空心铝型材挤压过程材料流速的影响 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (16): 52-58.  
Yu J Q, Zhao G Q, Zhang C S, et al. Effect of baffle-block on material flow velocity during thin-walled hollow aluminum profile extrusion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (16): 52-58.
- [10] Choi B J, Moon I Y, Oh Y S, et al. Die design for extrusion process of titanium seamless tube using finite element analysis [J]. Metals, 2021, 11 (9): 1338-1338.
- [11] Liu P, Xie S S, Cheng L. Die structure optimization for a large, multi-cavity aluminum profile using numerical simulation and experiments [J]. Materials & Design, 2012, 36: 152-160.
- [12] 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.
- [13] Sinha M K, Deb S, Dixit U S. Design of a multi-hole extrusion process [J]. Materials & Design, 2009, 30 (2): 330-334.
- [14] 殷剑, 黎诚, 金康, 等. 铝合金汽车前下摆臂成形工艺的有限元模拟与优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 74-82.  
Yin J, Li C, Jin K, et al. Finite element simulation and optimization on forming process of automobile front lower sway arm for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 74-82.

## 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极倡导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部