

## 多筋构件等温局部加载材料跨变形区转移的快速预测

唐海兵, 魏 科, 杨 超, 丁 潼, 何国云

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 针对多筋构件在等温局部加载过程中固有的材料跨区转移以及可能产生的折叠问题, 提出了一种能快速预测材料转移体积的方法。首先, 提取局部加载过渡区的几何特征结构, 并设计形状简易的等厚坯料以详细地反映材料跨区转移特征; 其次, 采用有限元模拟与物理模拟实验, 分析多筋构件局部加载成形过程, 根据过渡区材料流动特征及应力状态, 将加载区材料分为 3 个区域; 随后, 根据大小相等且方向相反的力平衡条件, 对这 3 个区域的基元体进行受力分析, 通过联立力的平衡方程与屈服方程, 利用边界条件对方程进行求解, 得到分流面位置及材料转移体积的预测模型; 最后, 将有限元分析结果与预测模型结果进行对比, 证实了预测结果的合理性和可靠性。

**关键词:** 等温局部加载; 材料转移体积; 分流面; 折叠; 力平衡

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.002

**中图分类号:** TG156      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0008-08

## Rapid prediction on material transfer across deformation zones for multi-rib component under isothermal

Tang Haibing, Wei Ke, Yang Chao, Ding Tong, He Guoyun

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Aiming at the inherent cross-area material transfer and the possible folding problem of multi-rib components in the isothermal local loading process, a method for quickly predicting the material transfer volume was proposed. Firstly, the geometric feature structure of transition zone under the local loading was extracted, and the equal thickness blank with a simple shape was designed to reflect the cross-area material transfer characteristics in detail. Secondly, the local loading forming process of multi-rib components was analyzed by finite element simulation and physical simulation experiments. Then, according to the material flow characteristics and stress state of material in the transition zone, the material in the loading zone was divided into three regions, and according to the force balance condition of equal size and opposite direction, the force analysis on the elementary bodies in these three zones was performed. Furthermore, the prediction model of neutral layer position and material transfer volume was obtained by the force equilibrium equation, yield equation and boundary conditions to solve the equation. Finally, the finite element analysis results were compared with the results of the prediction model to verify the rationality and reliability of the prediction results.

**Key words:** isothermal local loading; material transfer volume; neutral layer; folding; force balance

随着航空、航天等高科技产业的发展, 要求航空构件更加大型整体化、薄壁轻量化和形状复杂化<sup>[1-2]</sup>, 因此, 大量零部件被设计为带有纵、横筋的轻量化多筋薄腹板结构, 以满足其高可靠性和轻

质高效等需求。然而, 此类构件若采用传统整体锻造方式, 其对于设备吨位的要求较为苛刻。因此, 仅通过提高设备吨位的方式来解决成形能力不足的问题以获得高精度大型复杂锻件, 已不再是唯一的选择<sup>[3-4]</sup>。等温局部加载复合成形技术兼具了等温锻造和局部加载两种工艺的优点, 可有效降低大型多筋构件的成形载荷, 为更加省力地精确成形此类航空构件提供了可行的途径<sup>[5-6]</sup>, 可实现小设备干大活的目标。图 1 为等温局部加载过程示意图, 通过分块模具的交替加载与卸载, 使得多个变形区域依次逐步成形, 以此实现整个大型构件的局部加载成形。

收稿日期: 2023-01-20; 修订日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005241); 国家留学基金委项目 (202208360107); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2021-S673)

作者简介: 唐海兵 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: tanghaibingcmh@163.com

通信作者: 魏 科 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: weike@nchu.edu.cn

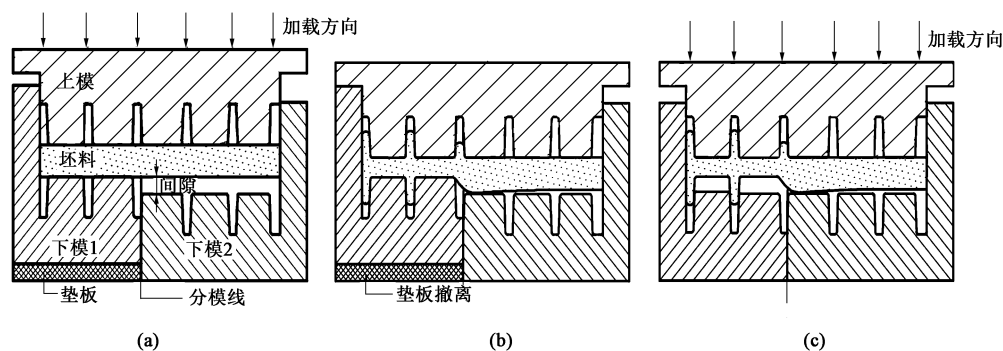


图 1 局部加载过程示意图

(a) 第 1 加载步开始 (b) 第 1 加载步结束 (c) 第 2 加载步开始

Fig. 1 Schematic diagrams of local loading process

(a) Beginning of the first loading step (b) End of the first loading step (c) Beginning of the second loading step

在局部加载过程中,材料分为先加载区和后加载区及协调这两个区域的变形过渡区。在第 1 加载步成形中,先加载区的部分材料会不可避免地转移至后加载区,这是局部加载所固有的材料流动现象。这种材料的跨区转移现象可能导致第 2 加载步成形中邻近分模线的腹板位置产生折叠缺陷<sup>[7-8]</sup>。已有学者对等温局部加载工艺开展了研究,如 Sun Z C 等<sup>[9]</sup>设计了反映多筋构件成形特点的 T 型件,模拟分析了局部加载的变形特征,揭示了压下宽度、外端约束、过渡区宽度对局部加载材料变形模式及筋槽充填与筋错移的影响。孙念光等<sup>[10]</sup>研究了模锻形式对局部加载构件的影响,结果表明,闭式模锻能较好地避免局部加载中材料横向流动导致的穿筋流线缺陷。孙志超等<sup>[11]</sup>分析了局部加载分区大小、位置对钛合金整体隔框成形的影响规律。Li X T 等<sup>[12]</sup>针对镁合金加筋框体结构等温局部成形,研究了不同加载方式对成形载荷与材料充填的影响,确定了最佳工艺参数。

在等温局部加载材料跨区转移导致的折叠缺陷方面,Gao P F 等<sup>[13]</sup>建立了基于折叠指数的缺陷判据及其与过渡区模具结构参数间的关联关系,实现了不同过渡区模具结构下折叠的快速预测。Zhang D W 等<sup>[14]</sup>抽取了筋板构件得到 T 型结构,采用主应力法建立了压下量与材料充填的关联关系,通过实验和有限元法进行了验证。Wei K 等<sup>[15]</sup>研究了等温局部加载过渡区不确定性因素的影响,分析了坯料制造公差、模具行程、摩擦因数及变形温度等不确定性因素的波动,对坯料进行了多目标稳健优化设计。上述研究针对多筋构件等温局部加载的变形特点、充填规律、缺陷产生的原因及控制方法进行了详细分析,为避免宏观缺陷提供了依据。但在局部加载多变形区的

交互作用下,快速预测跨区材料转移对于把握局部加载成形规律、认知复杂多模具交替加载成形过程以及过渡区的成形质量尤为重要。因此,有必要对过渡区材料的跨变形区转移进行快速定量预测。

基于塑性成形过程中的有限元建模与数字化预测理论,徐宁宁等<sup>[16]</sup>针对镁合金板形件扭挤成形工艺,采用主应力法建立了镁合金扭挤成形载荷的求解模型,并通过有限元模拟验证了模型的准确性。姜雪鹏等<sup>[17]</sup>提出了一种基于主应力法和能量法的 T 型三通管模锻加工过程变形力的实时预测方法,建立了子阶段成形变形力与冲头下压速度、下压量、摩擦等因素的解析模型,通过有限元方法验证了该模型的准确性。吕文兵等<sup>[18]</sup>针对不规则形状锻件,提出了集成机理与数据的复杂模锻过程在线建模方法,采用物理与过程知识推导了锻造过程的解析模型,使用极限学习机构建了由于泄露、不确定性引起的偏差模型,实现了锻造过程模型的实时进化。上述研究所建立的求解模型为本文的研究提供了参考。

本文针对多筋构件在等温局部加载过程中固有的材料跨区转移现象,提出了一种能快速预测材料转移体积的方法,其中快速是指通过建立材料跨区转移体积预测模型,将坯料尺寸、多筋结构中的筋间距与筋宽、摩擦因数等参数带入模型中,以计算的方式获取材料转移体积。随后,根据特定多筋结构的材料转移体积,快速判定出折叠是否生成。该方法相比于有限元模拟及实验,不仅可以节省时间,还可以获取模具不同下压时刻的材料转移体积,有利于理解局部加载过程中的材料跨区转移规律。鉴于此,本文首先通过有限元模拟分析多筋特征构件在等温局部加载过程中的材料跨区流动,探明不同

变形区域的应力状态；随后，基于主应力法建立力平衡方程，求解材料转移的体积预测模型，定量计算分流面位置及材料跨区转移体积；最后，将有限元模拟结果与预测模型结果进行对比，证实预测模型的合理性与可靠性。本文研究能够为避免局部加载成形过渡区折叠的生成提供参考依据，为实现大型筋板构件的形性一体化调控提供理论基础。

## 1 有限元模型的构建及实验

### 1.1 有限元模型

以图 2a 所示的多筋构件为研究对象，该构件由

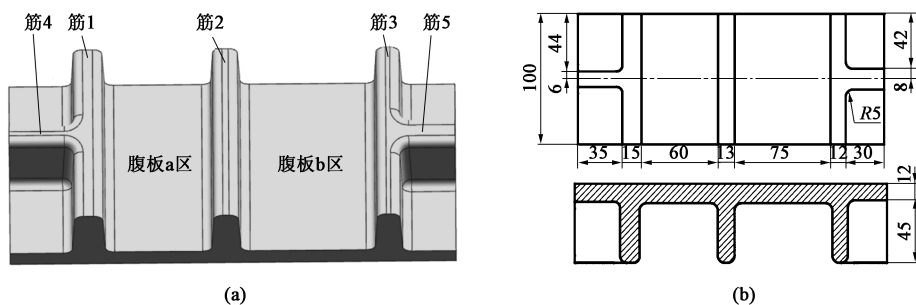


图 2 多筋构件示意图

(a) 几何结构 (b) 尺寸参数

Fig. 2 Schematic diagrams of multi-rib component

(a) Geometric structure (b) Dimension parameters

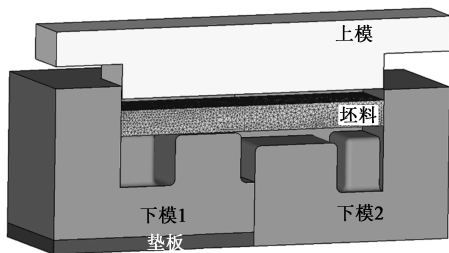


图 3 多筋构件的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of multi-rib component

将几何模型导入有限元模拟软件，建立等温局部加载有限元模型，工件材料选用 TA15 钛合金，材料模型来源于文献 [19]。工件与模具之间的接触边界采用剪切摩擦模型，摩擦因数定为  $0.5^{[20]}$ ，变形温度采用近  $\beta$  锻造的  $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加载速度设为  $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因模具变形远小于工件，因此，将工件定为塑性体，模具定为刚性体。由于该构件沿筋 4 与筋 5 的中心线对称，因此，采用沿中心对称的  $1/2$  模型进行计算，以提高模拟效率。

### 1.2 物理模拟实验

根据文献 [8] 和文献 [21] 可知，铅在室温

3 根纵筋和 2 根横筋构成，并分别定义为筋 1~筋 5。其中，筋 1 与筋 2 之间的区域为腹板 a 区，其变形实施于第 1 加载步；筋 2 与筋 3 之间的区域为腹板 b 区，其变形实施于第 2 加载步。具体尺寸参数如图 2b 所示。在局部加载过程中，工件上存在先、后加载区，实施第 1 加载步前，将垫块置于下模 1 下方，使下模 1 的位置相对下模 2 凸出，如图 3 所示。局部加载工艺步骤如图 1 所示，该方案分为 3 步：第 1 加载步成形下模 1 对应的坯料区域；在第 2 加载步前，取出下模 1 下方的垫块，下模 1 和下模 2 的下表面处于同一水平面，构成整体下模；第 2 加载步仅成形下模 2 对应的坯料区域。

下的流动行为与钛合金在高温下锻造的材料流动行为相似。因此，本文以铅为实验材料，以进一步研究局部加载过程中的材料跨区转移及折叠形成过程，以便于实验操作并节省成本。将坯料设计为  $240\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 22\text{ mm}$  的方坯，实验用模具材料为 5CrNiMo 合金钢，模具经淬火处理。实验设备为 2000 t 压力机，分块模具与坯料如图 4 所示。

### 1.3 实验与有限元模拟的结果与分析

在初始条件相同的情况下，将有限元模拟结果与实验结果进行比较。在第 1 加载步成形过程中，材料由腹板 a 区向腹板 b 区转移，如图 5a 所示，使得工件在腹板 b 区发生一定程度的翘曲，随着材料转移体积的增大，位于后加载区的材料与分块下模 2 接触，在靠近分模线位置产生了局部应力集中现象，如图 5b 所示。在第 2 加载步成形过程中，位于后加载区的材料向已成形的先加载区转移，此时材料由腹板 b 区向腹板 a 区方向流动，导致腹板处的材料与跨变形区转移的材料汇集，进而生成折叠。实验结果与模拟结果所观测到的折叠位置相一致，如图 6 所示。这与 Gao P F 等<sup>[22]</sup>采用“m”型多筋



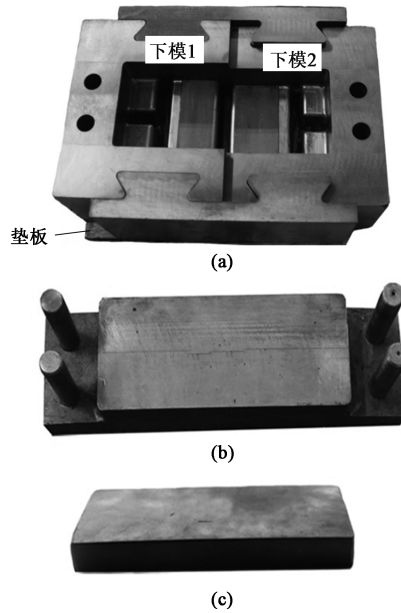


图 4 下模 (a)、上模 (b) 和坯料 (c) 的实物图

Fig. 4 Real drawings of lower die (a), upper die (b) and blank (c)

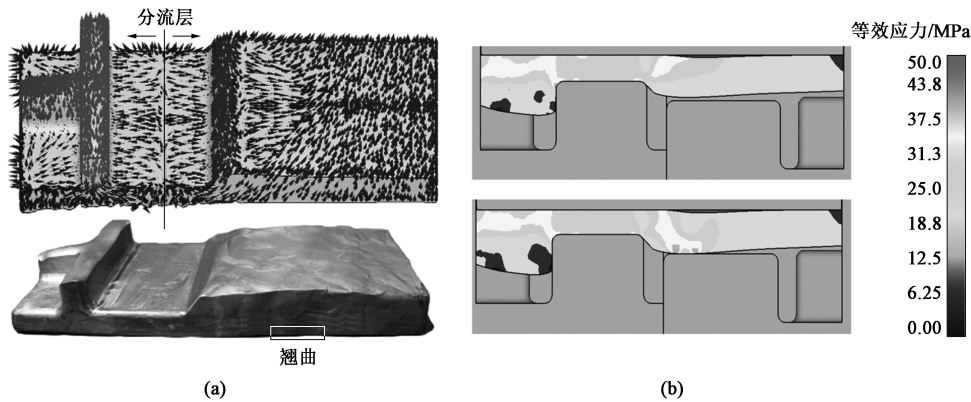


图 5 第 1 加载步结果图

(a) 有限元模拟及实验结果 (b) 等效应力分布

Fig. 5 Result diagram of the first loading step

(a) Results of finite element simulation and experiment (b) Equivalent stress distribution

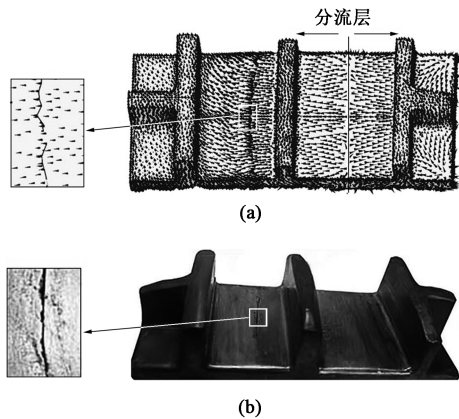


图 6 第 2 加载步的有限元模拟 (a) 及实验 (b) 结果

Fig. 6 Results of finite element simulation (a) and experiment

(b) for the second loading step

构件局部加载平面应变下观察到的结果相一致，这表明材料转移量与折叠缺陷的严重程度呈线性关系，即当转移材料降低到某一临界值时，折叠可以避免。据此结论可推断出：所预测的材料转移体积小于该临界值时，则判定折叠未生成。

## 2 力平衡方程推导

如图 5 和图 6 所示，其中，图 5b 上、下图分别为材料向未加载区转移时和材料与模具接触时的等效应力分布情况，位于腹板 a 区和腹板 b 区的材料在流动过程中，材料的跨变形区转移行为相似，并且两区的应力状态相同，因此，本文主要以腹板 a 区的材料转移过程为例，建立力平衡方程。

图 7a 给出了第 1 加载步中筋 4 和筋 5 中心线对称面的材料流动及分流面示意图，将筋 1 与筋 2 之间形成的分流面定为边界，将坯料第 1 加载步划分

为 3 个区域，并以 I、II 和 III 标识，如图 7b 所示。随后，对不同区域的基元体进行受力分析，如图 7c 所示。其中， $L_{12}$  为筋 1 与筋 2 之间的间距，涵盖了 I、II 两个区； $x_l$  为分模线到分流面之间的间距，即分流面位置，仅涵盖了 I 区，该值决定了某加载步中的材料转移量，是本文研究的关键之一； $b_1$  为筋 1 的筋宽； $H$  为坯料初始厚度。

在第 1 加载步的上模下压过程中，位于腹板 a 区的材料可看成微粗变形状态，因此，只有  $Z$  与  $X$  方向存在应力。并且，当筋 1 与筋 2 之间的材料沿横向应力达到平衡时，即  $\sigma_X^I = \sigma_X^{II}$ （其中， $\sigma_X^I$  与  $\sigma_X^{II}$ 、 $\sigma_Z^I$  与  $\sigma_Z^{II}$  分别为 I 区和 II 区在  $X$  和  $Z$  方向的应力），分流面则开始在筋 1 与筋 2 之间形成，因此，

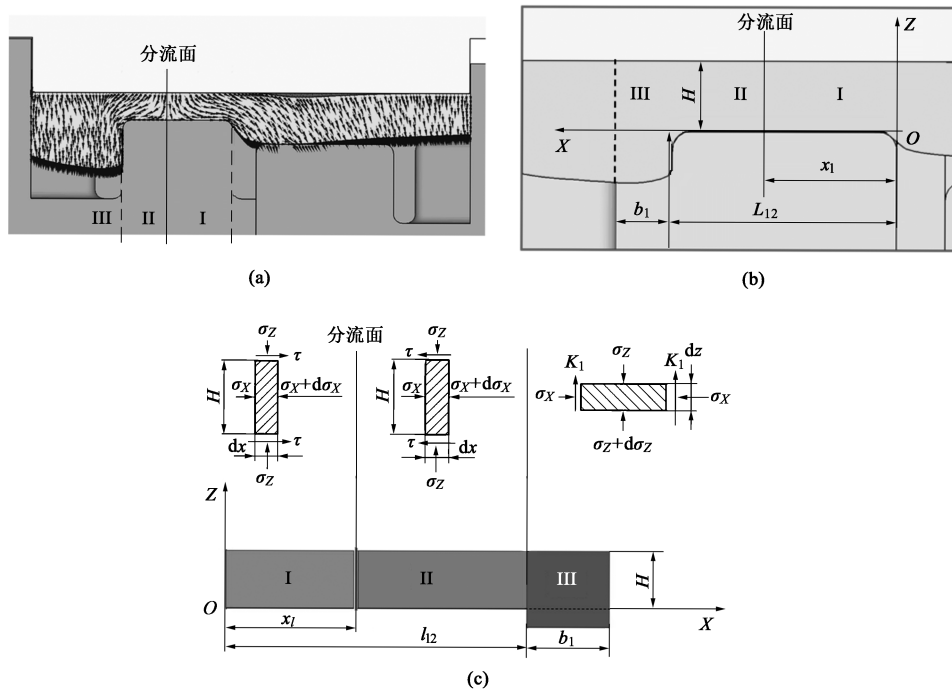


图 7 多筋构件局部加载过程示意图

(a) 第 1 加载步材料流动及分流面 (b) 第 1 加载步坯料分区 (c) 不同区域的基元体受力图

Fig. 7 Schematic diagrams of local loading process for multi-rib component

(a) Material flow and neutral layer during the first loading step (b) Region partition of billet during the first loading step

(c) Force diagrams of elemental structure in different regions

将  $\sigma_x^I = \sigma_x^{II}$  作为分流面形成的平衡条件。本文将筋 1 与筋 2 之间工件的加载过程简化为平面应力问题, 并满足以下基本假设以简化计算。

(1) 将模具视为理想刚性体, 坯料视为塑性体, 且受力均匀。

(2) 钛合金在高温低应变速率等温成形过程中, 忽略温度效应的影响, 流动应力在变形区视为常数。

(3) 满足屈雷斯加屈服方程<sup>[23]</sup>:

$$K = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为最大、最小主应力;  $K$  为材料屈服时的最大切应力。

(4) 将工件与模具之间的摩擦类型视为剪切摩擦。

依据第 1 加载步材料流动特征, I 区材料发生镦粗变形, 材料向腹板 b 区流动, 此时腹板受到剪切摩擦力, 因此, 可以对腹板 a 区的单元体进行受力分析。

根据图 7c 中基元体受力分析结果, 并结合应力平衡条件建立力平衡方程, 将力平衡方程与屈雷斯加屈服方程联立求解, 可得式 (2):

$$\sigma_x^I H - (\sigma_x^I + d\sigma_x^I) H + 2mKdx = 0 \quad (2)$$

式中:  $m$  为材料受到剪切摩擦力的摩擦因数;  $x$  为坯料在  $X$  方向的变形量。

材料变形遵循屈雷斯加屈服准则, 因此可得到:

$$K = \frac{|\sigma_z - \sigma_x^I|}{2} \quad (3)$$

$$d\sigma_x^I = \frac{2mK}{H} dx \quad (4)$$

对式 (4) 求解不定积分, 可得到式 (5):

$$\sigma_x^I = \frac{2mK}{H} x + C_1 \quad (5)$$

式中:  $C_1$  为不定积分常数。

当压下量  $s \approx 0$ , 即  $z \approx H$ ,  $z$  为坯料在  $Z$  方向的变形量, 此时 I 区的材料在  $Z$  方向的应力  $\sigma_z^I \approx 0$ , 因此边界条件为:

$$\begin{cases} z \approx H \\ \sigma_z^I \approx 0 \end{cases} \quad (6)$$

将边界条件式 (6)、式 (3) 与式 (5) 联立可得:

$$\sigma_x^I = \frac{2mK}{H} x + 2K \quad (7)$$

当位于 III 区腹板处的材料受到镦挤变形时, 向上剪切力  $K_1 = K$ , 如图 7c 所示, 可得:

$$\sigma_z^{\text{III}} b_1 - (\sigma_z^{\text{III}} + d\sigma_z^{\text{III}}) b_1 + 2K_1 dz = 0 \quad (8)$$

式中： $\sigma_z^{\text{III}}$  为Ⅲ区在  $Z$  方向的应力。

式 (8) 可化简得：

$$d\sigma_z^{\text{III}} = \frac{2K}{b_1} dz \quad (9)$$

$$\sigma_z^{\text{III}} = \frac{2K}{b_1} z + C_2 \quad (10)$$

式中： $C_2$  为不定积分常数。

同理，当压下量  $s \approx 0$ ，即  $z \approx H$  时，Ⅲ区的坯料在  $Z$  方向的应力  $\sigma_z^{\text{III}} \approx 0$ ，因此边界条件为：

$$\begin{cases} z \approx H \\ \sigma_z^{\text{III}} \approx 0 \\ \sigma_x^{\text{III}} \approx 2K \end{cases} \quad (11)$$

将式 (3)、式 (11) 与式 (10) 联立求解，得式 (12) ~ 式 (14)：

$$\sigma_x^{\text{III}} = 2K \left( 1 + \frac{z}{b_1} \right) \quad (12)$$

$$t = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma_x^{\text{III}} dz \quad (13)$$

$$t = 2K \left( 1 + \frac{H}{2b_1} \right) \quad (14)$$

式中： $t$  为Ⅱ区与Ⅲ区交界面的应力。

同理，对Ⅱ区进行分析，依据图 7b 中的受力分析，可得：

$$\sigma_x^{\text{II}} H - (\sigma_x^{\text{II}} + d\sigma_x^{\text{II}}) H - 2mK dx = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_x^{\text{II}} = -\frac{2mK}{H} x + C_3 \quad (16)$$

式中： $C_3$  为不定积分常数。

当  $x=L_{12}$  时，此时Ⅱ区在  $X$  方向的应力为Ⅱ区与Ⅲ区交界面的应力：

$$\sigma_x^{\text{II}} = t \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16) 中解得：

$$C_3 = t + \frac{2mKL_{12}}{H} \quad (18)$$

$$\sigma_x^{\text{II}} = \frac{2mK}{H} (L_{12} - x) + t \quad (19)$$

根据分流面两侧应力相等，即  $\sigma_x^{\text{I}} = \sigma_x^{\text{II}}$ ，因此，联立式 (7)、式 (14) 与式 (19) 解得：

$$x_l = \frac{L_{12}}{2} + \frac{H^2}{4mb_1} \quad (20)$$

当压下量为  $s$  时，坯料的厚度为  $H'$ ，即：

$$H' = H - s \quad (21)$$

根据式 (20) 可得分流面位置为：

$$x_l = \frac{L_{12}}{2} + \frac{H'^2}{4mb_1} \quad (22)$$

因此，材料转移的体积  $V$  为：

$$V = D \int_0^s x_l dH \quad (23)$$

式中： $D$  为坯料宽度； $V$  为在压下量为  $s$  时材料转移的体积。

### 3 结果分析及模型验证

根据式 (22) 和式 (23)，利用 Matlab 计算得到分流面位置与材料转移体积的大小。为详细反映材料跨区转移情况，本文采用材料转移率  $M_l$  来进行定量表征：

$$M_l = (Q_2 - Q_1)/Q \times 100\% \quad (24)$$

式中： $Q_1$  为上模下压后的加载区工件体积； $Q_2$  为上模下压前加载区坯料体积； $Q$  为目标构件总体积。

图 8 为模拟与预测模型在不同压下量时的计算结果。将模型预测结果与有限元模拟结果进行对比分析可知，对于第 1 加载步，采用预测模型求解得出的分流面位置 and 材料转移率相比于模拟结果的最大误差分别为 17.70% 和 5.23%，平均误差分别为 10.32% 和 1.83%。其中，最大误差出现在压下量接近于 8 mm 时，此时腹板 a 区的材料向腹板 b 区转移的累积量逐渐增多，致使工件接触了未加载区的下模，如图 5b 所示。此后，接触面对跨区流动的材料产生了一个反向约束力，使得  $\sigma_x^{\text{I}}$  增大。为使  $\sigma_x^{\text{I}}$  与  $\sigma_x^{\text{II}}$  重新达到力平衡（即  $\sigma_x^{\text{I}} = \sigma_x^{\text{II}}$ ）， $\sigma_x^{\text{II}}$  也将增大，由此加快了图 7a 所示的分流面向分模线偏移的速率，也减少了材料体积转移的速率。然而，在预测模型中忽略了该处接触所产生的应力增大的影响，因此，压下量接近 8 mm 以后，预测模型求解的分流面位置与有限元模拟结果的误差增大，这也导致了预测模型计算的材料转移率总体上略小于模拟结果，如图 8b 所示。但通过计算发现材料跨区转移率的误差非常小，因此，可忽略其对计算结果的影响。同理，对于第 2 加载步，采用预测模型求解得出的分流面位置 and 材料转移率相比于有限元模拟的最大误差分别为 12.54% 和 4.25%，平均误差分别为 7.13% 和 2.29%，误差原因与第 1 加载步相同。

值得注意的是，对于带有多个筋条的框梁型构件局部加载成形，无论是哪种几何尺寸的框梁构件（包含不同筋间距和筋宽高等），均存在平面应变微

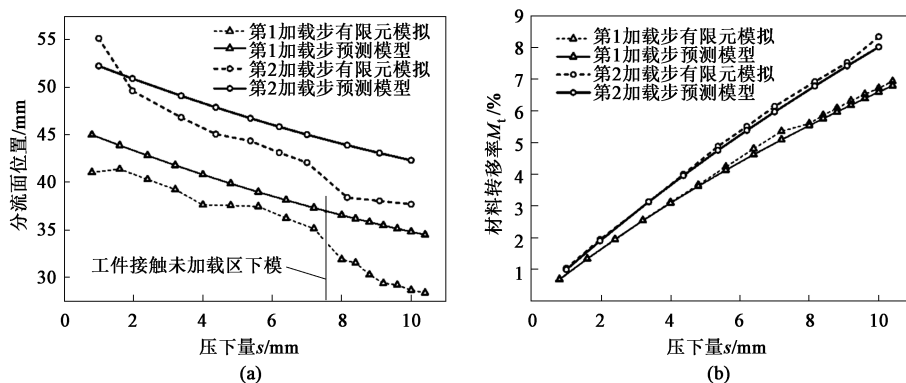


图 8 模拟与预测模型在不同压下量时的计算结果对比

(a) 分流面位置 (b) 材料体积转移率

Fig. 8 Comparison between simulation and prediction model results at different reduction amounts

(a) Position of neutral layer (b) Transfer rate of material volume

粗型与平面应变镦挤型两种材料流动类型, 图 7a 中的 I 区和 II 区为平面应变镦粗型、III 区为平面应变镦挤型。因此, 本文提出的快速预测材料转移对于不同几何尺寸的框梁构件具有通用性, 对局部加载成形工艺的材料跨区转移规律研究具有较好的指导意义。就框梁型构件而言, 若几何构型改变, 本文的研究方法与思路也是通用的。然而, 对于其他形式的构件, 如盘类、轴类和杆类构件, 其材料流动与多筋构件存在一定的差异, 因此, 本文取得结论与规律对这些构件无通用性。

## 4 结论

(1) 将加载区域从分模线至首根筋之间的位置划分为 3 个变形基元体, 基于主应力法和应力平衡条件推导了力平衡方程, 获取了分流面位置及材料转移体积的预测模型。

(2) 通过模型计算发现, 随着压下量增大, 跨区转移材料逐渐增多, 并与未加载区模具的接触面积逐渐增大, 导致工件上产生的局部应力也随之增大, 促使了分流面逐渐靠近分模线, 导致材料在单位时间内流向未加载区的体积有所减小。

(3) 材料转移预测与模拟结果的最大误差在第 1 加载步时为 5.23%, 第 2 加载步时为 7.1%, 平均误差分别为 1.83% 和 2.29%, 说明所提出的局部加载材料转移快速预测方法是可靠且有效的。

### 参考文献:

[1] 高鹏飞, 于超, 雷珍妮, 等. 钛合金复杂构件等温锻宏微观成形规律与调控研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7):

21-32.

Gao P F, Yu C, Lei Z N, et al. Research progress on macro and micro forming law and regulation of isothermal forging of titanium alloy complex components [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 21-32.

[2] Yuan S J, Fan X B. Developments and perspectives on the precision forming processes for ultra-large size integrated components [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1 (2): 34-51.

[3] 魏科, 马庆, 徐勇, 等. 大型/复杂模锻件省力成形工艺研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 166-182.

Wei K, Ma Q, Xu Y, et al. Research progress on labor-saving forming process of large/complex die forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 166-182.

[4] 王仲仁, 张琦. 模锻省力的原理与途径 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (18): 92-98.

Wang Z R, Zhang Q. Principle and approach of labor saving in die forging [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (18): 92-98.

[5] Zhang D W, Fan X G. Review on intermittent local loading forming of large-size complicated component: Deformation characteristics [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99: 1427-1448.

[6] Wei K, Ma Q, Wang G C, et al. Exploration of the material transfer effect in local loading forming of ultra-large-size integrated component with multi-rib [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108 (2): 1-15.

[7] 唐海兵, 魏科, 钟锐, 等. 航空框梁构件等温局部锻造成形的材料跨变形区转移规律研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 6-12.

Tang H B, Wei K, Zhong R, et al. Grain size evolution of large titanium alloy components during isothermal local loading [J]. Forging & Stamping Technology, 46 (12): 6-12.

[8] Gao P F, Fei M, Yan X G, et al. Prediction of the folding defect in die forging: A versatile approach for three typical types of folding defects [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 181-



- 191.
- [9] Sun Z C, Yang H. Characteristic of large-scale and complex rib-web components isothermal local loading forming [A]. Advanced Technology of Plasticity 2008, 9<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity [C]. Gyeonggi, 2008.
- [10] 孙念光, 杨合, 孙志超. 大型钛合金隔框等温闭式模锻成形工艺优化 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38 (7): 1296-1300.
- Sun N G, Yang H, Sun Z C. Optimization of isothermal closed die forging process for large titanium alloy spacer frame [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38 (7): 1296-1300.
- [11] 孙志超, 杨合, 孙念光. 钛合金整体隔框等温成形局部加载分区研究 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (1): 138-143.
- Sun Z C, Yang H, Sun N G. Study on local loading zoning of isothermal forming of titanium alloy integral spacer frame [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (1): 138-143.
- [12] Li X T, Qian L Y, Sun C Y, et al. The effect of loading mode on isothermal local loading forming of magnesium alloy rib-web component [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (7): 2485-2497.
- [13] Gao P F, Yang H, Fan X G, et al. Quick prediction of the folding defect in transitional region during isothermal local loading forming of titanium alloy large-scale rib-web component based on folding index [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 101-111.
- [14] Zhang D W, Yang H, Sun Z C. Analysis of local loading forming for titanium-alloy T-shaped components using slab method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (2): 258-266.
- [15] Wei K, Fan X G, Zhan M, et al. Uncertainty analysis and multi-objective billet robust optimization for transitional region of multi-rib component under isothermal local loading forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (1-4): 1165-1179.
- [16] 徐宁宁, 孙朝阳, 钱凌云, 等. 镁合金板形件扭挤成形载荷的主应力法求解模型 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (4): 73-82.
- Xu N N, Sun C Y, Qian L Y, et al. Principal stress method solution model of torsional extrusion load of magnesium alloy sheet metal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (4): 73-82.
- [17] 姜雪鹏, 潘晴, 李毅波, 等. T型三通多向模锻过程变形力预测方法 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 113-125.
- Jiang X P, Pan Q, Li Y B, et al. Prediction method of deformation force in multi-directional die forging process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 113-125.
- [18] 吕文兵, 陆新江, 黄明辉, 等. 集成机理与数据的复杂模锻过程在线建模方法 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (9): 1227-1232.
- Lyu W B, Lu X J, Huang M H, et al. Online modeling method of complex die forging process integrating mechanism and data [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (9): 1227-1232.
- [19] Xiao H, Fan X G, Zhan M, et al. Flow stress correction for hot compression of titanium alloys considering temperature gradient induced heterogeneous deformation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116868.
- [20] Zhang D W, Yang H. Numerical study of the friction effects on the metal flow under local loading way [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68 (5-8): 1339-1350.
- [21] Robinson T, Ou H A, Armstrong C G. Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 54-59.
- [22] Gao P F, Yang H, Fan X G. Quantitative analysis of the material flow in transitional region during isothermal local loading forming of Ti-acmponent [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75 (9): 1339-1347.
- [23] 汪大年. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- Wang D N. Principles of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 1982.

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程(锻压)分会成立于1963年,是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体,是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定:凡承认本会章程并符合条件者,可申请为本会会员。

**会员的权利与义务:** 1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌,铜牌由秘书处统一制作并颁发,可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料,免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志; 5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权; 7. 接受本会委托,进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续:** 提交入会申请表。申请个人会员,需填写《个人会员入会申请表》,同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员,需填写《团体会员入会申请表》,同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处,并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱;也可登陆学会网站,进行在线注册。经审批通过后,将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记,由学会秘书处颁发会员证书。

**地 址:** 北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会

**联系人:** 李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

**电 话:** 010-62912592 **传 真:** 010-62912592 **邮 箱:** duanya@cmes.org **网 址:** http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会