

TA15 合金 H 型构件等温局部加载成形工艺研究

孙志超, 杨 合, 李志燕

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 基于 DEFORM3D 平台, 建立筋板类构件等温局部加载宏观有限元模型, 对 TA15 钛合金 H 型构件等温局部加载成形工艺进行研究, 揭示了局部加载过程中加载模式、分模面位置、加载次序及加载参数对筋的充填和初生 α 相晶粒尺寸的影响规律。结果表明: 分模面位置设在筋上比设在腹板上的筋充填性好, 初生 α 相晶粒尺寸分布均匀; 相对于只采用局部加载成形, 先局部加载后整体精整使得变形更均匀, 筋的充填差较小并且流线分布更合理; 改变局部加载成形参数, 即增大横向筋和腹板、纵向筋和腹板之间的圆角半径, 分模面处的纵向筋和横向筋的充填深度差增大; 增加上模压下速度, 使筋的充填深度减小, 初生 α 相晶粒尺寸减小, 但分布越来越不均匀; 在两相区成形加载次序对初生 α 相的晶粒尺寸影响不显著。

关键词: 等温局部加载; H 型构件; 晶粒尺寸; TA15 钛合金

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)11-1904-06

筋板类构件在航天、航空领域有着十分广泛的应用。为满足减重的需要, 这类构件通常被设计成薄腹板并带有纵、横内筋的结构, 采用传统的锻造方法不但现有设备吨位不能满足要求, 而且不可避免地会产生诸如充填不满、穿筋等成形缺陷^[1,2]。等温局部加载是指在等温条件下仅向工件某个局部施加变形力, 通过变换加载位置来实现大型复杂整体构件成形。等温成形可以有效降低材料流动应力, 而局部加载不仅能降低成形载荷, 还能有效改变材料应力状态提高塑性成形能力^[3]。等温局部加载工艺为这类构件的成形提供了一种可能的新途径。

筋板类构件等温局部加载由于在成形的每一阶段坯料只是局部区域受载变形, 成形过程中存在加载变形区、未变形区和变形过渡区以及它们之间的转换, 工艺过程复杂, 影响参数多^[4]。对于带有纵横筋的筋板类构件局部加载成形, 加载方式及分模面位置的不合理设置可能会导致过渡区产生折叠, 流线折断等缺陷, 局部加载参数的设置不合理可能会导致筋充填不满, 纵横筋交叉处产生汇流等缺陷。同时局部加载过程中变形方式的特殊性(变形的不同步性), 使得先变形的区域发生空烧, 可能会导致晶粒尺寸分布不均匀, 从而影响锻件的微观组织。因此, 加载方式及分模面的合理设置, 加载参数的有效控制是局部加载成形的关键。局部加载方式下筋板类构件成形是一个多场多

因素耦合作用的复杂过程, 而数值模拟方法可以实现对成形过程全方位的虚拟模拟, 获得成形过程各种详细的场变量信息。以提取能够有效反映筋板类构件成形特点的 H 型构件为研究对象, 采用数值模拟的方法研究分析局部加载条件对材料充填和初生 α 相平均晶粒尺寸的影响规律。

1 有限元模型

图 1 所示为反映筋板类构件成形特点的典型 H 型构件。基于 DEFORM 平台, 建立上述 H 型构件等温局部加载成形刚粘塑性有限元模型如图 2 所示^[5]。选用 CATIA 软件实现模具和坯料的几何造型, 主要的几何参数如表 1 所示。考虑到模具的刚度远大于坯料的刚度, 将模具作为刚体处理。

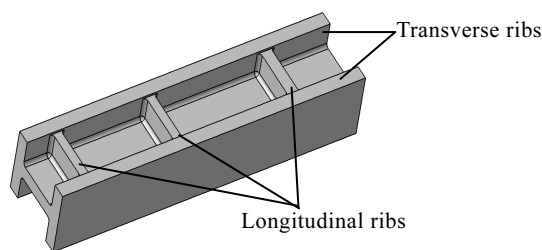


图 1 典型 H 型构件

Fig.1 Typical H-shaped component^[5]

收到初稿日期: 2009-02-05; 收到修改稿日期: 2009-07-07

基金项目: 国防基础科研“863”计划 (2006AA04Z135); 国家自然科学基金重点项目(50735005); 西北工业大学基础研究基金

作者简介: 孙志超, 男, 1974, 博士, 副教授, 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88460212-802, E-mail: zcsun@nwpu.edu.cn

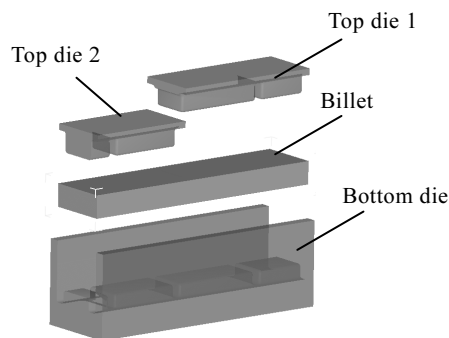


图 2 H 型构件等温局部加载成形有限元模型

Fig.2 FE model of H-shaped component isothermal local loading

表 1 模具主要几何参数

Table 1 Parameters of die

Height of upper rib, h_1 /mm	33
Height of lower rib, h_2 /mm	25
Height of transverse rib, h_3 /mm	38
Width of transverse rib, b_1 /mm	13
Width of longitudinal rib, b_2 /mm	20
The width between left rib and middle rib, w_1 /mm	148
The width between right rib and middle rib, w_2 /mm	182

坯材为 TA15 钛合金, 材料的流动应力为变形温度、应变速率和应变的函数, 即 $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$, 相关数据取自文献[6]。选取常系数剪切模型来描述模具和坯料间的摩擦。根据实际钛合金等温成形过程, 取摩擦因子 $m=0.3$, 等温锻造温度设为 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 下模静止, 增量计算时, 每次压下量为 0.02 mm 。同时本实验室通过热模拟试验测得数据, 采用 BP 神经网络建立微观组织模型并嵌入到有限元软件 DEFORM 中进行运算并得到了验证[7]。

2 分模位置对构件成形的影响

局部加载分区及分模面位置的选取是局部加载成形工艺首先要考虑的因素。图 3 为不同分模位置时的等效应变分布云图。从图中看出, 分模面在腹板上时, 分模面处的等效应变值较大, 应变分布不均匀, 分模面在筋上时, 等效应变分布较均匀。同时研究发现, 分模面位置设在腹板上, 中间筋易充填不满, 分模面处容易产生折叠, 由于模具之间的配合间隙, 分模处可能会出现毛刺, 或者鼓包, 将不利于后面加载过程的实现, 或者加载过程出现折叠、穿筋等缺陷, 进而会影响锻件的质量。若把分模面设在筋上, 未加载区变形之前, 部分材料在此集聚, 对于未成形筋来说相

当于聚料过程, 使得后充填筋的充填更容易。

图 4 为分模面不同位置时的晶粒尺寸分布云图。由图 3 和图 4 可以看出, 分模面在筋上时, 晶粒分布均匀, 但分模面在腹板上时, 分模面处应变值较大, 变形很不均匀, 在分模面处晶粒尺寸分布不均匀, 进而影响锻件的力学性能。由此得出, 分模面设在筋上时, 充填性能较好, 初生 α 相晶粒尺寸分布也较均匀。

3 加载参数对构件成形的影响

3.1 圆角半径对构件成形的影响

图 5 为筋的充填腹板圆角半径变化曲线。由图 5 可以看出, 当只增加横向筋与腹板之间的圆角半径时, 有利于外缘筋的充填, 分模处纵向筋和横向筋之间的充填深度差减小。这是由于纵向筋和腹板之间的圆角半径较小, 增大了纵向筋的充填阻力, 纵向筋和横向筋的充填均匀。同时增大纵向筋和腹板之间的圆角半径时, 分模面处纵向筋和横向筋之间的充填深度差增大。因为纵向筋和腹板之间的圆角半径越大, 金属向

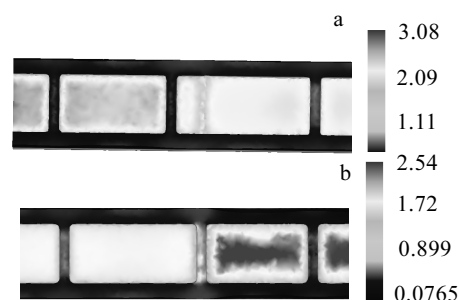
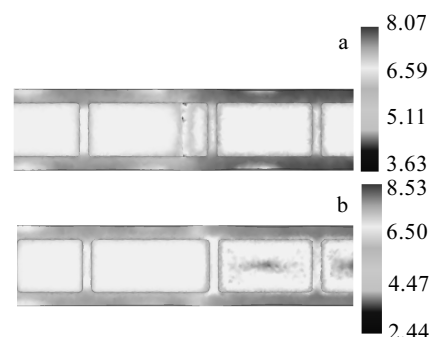


图 3 等效应变分布云图

Fig.3 Distribution of equivalent strain: (a) partitioned on the web and (b) partitioned along the rib

图 4 初生 α 相晶粒尺寸分布云图Fig.4 Distribution of primary α phase grain size (μm): (a) partitioned on the web, and (b) partitioned along the rib

上流动的阻力越小,纵向金属流动比横向金属流动多,金属在纵向筋上向上越容易充填,且横向筋和纵向筋的下部充填深度减小。为了保证纵横筋交叉处筋的充填质量,应增大较难充填筋与腹板之间的圆角半径,减小容易充填筋与腹板之间的圆角半径,使得各筋充填均匀。

3.2 加载速度和温度对构件成型的影响

为研究不同的加载条件下工件的充填性,采用点跟踪法,跟踪特定点的充填深度,如图 6 所示。跟踪点 1, 3, 5 分别设在纵横筋的交界处,2 和 4 分别位于 1 和 3, 3 和 5 之间。

图 7 为不同压下速度下各跟踪点的充填深度曲线。可以看出,随上模压下速度的增加,各跟踪点的充填深度差逐渐增大,上模压下速度越小,曲线越平缓,各跟踪点的充填深度相差越小。跟踪点 1, 3, 5 处于纵向筋和横向的交叉处,充填较困难,其充填深度比 2 和 4 处的充填深度小,由此得出,随加载速度的增加,纵向筋和横向筋充填越来越不均匀。尤其是纵横筋交叉处,纵向筋和横向筋的充填深度差明显增大。

图 8 是变形温度为 950 °C 时,不同加载速度下,初生 α 相晶粒尺寸分布图。当变形速度很小时,晶粒

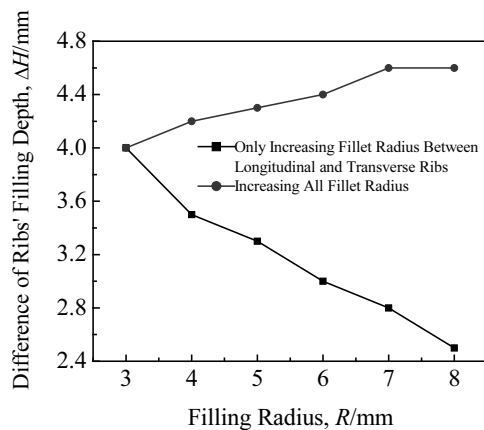


图 5 筋与腹板圆角半径对筋充填性的影响

Fig.5 Effect of fillet radius between rib and web on the filling of rib

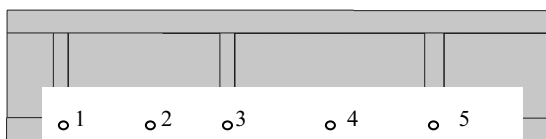


图 6 跟踪点的位置

Fig. 6 Setting of tracking points

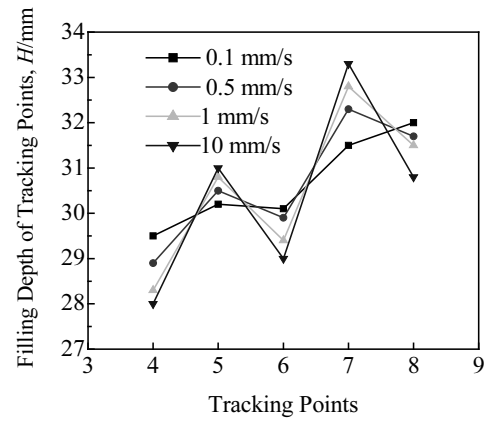


图 7 跟踪点充填深度曲线

Fig.7 Filling depth of tracking points

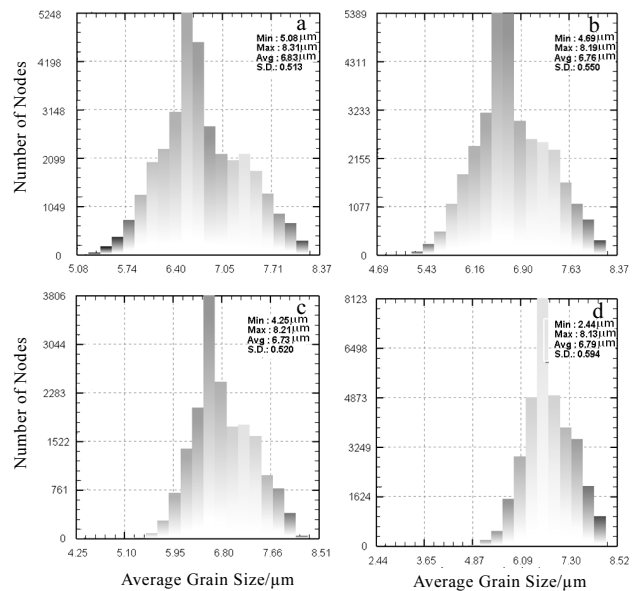


图 8 不同压下速度下初生 α 相晶粒尺寸分布

Fig.8 Distribution of primary α phase grain size at different pressing speeds: (a) 0.1 mm/s, (b) 0.5 mm/s, (c) 1 mm/s, and (d) 10 mm/s

尺寸的平均值基本保持不变,晶粒尺寸分布均匀,随压下速度的增大,平均晶粒尺寸有减小的趋势,晶粒尺寸的分布越来越不均匀。

3.3 加载模式和道次对成型的影响

图 9 为不同加载方式下各跟踪点的充填情况。由图看出,先局部后整体的加载方式下各点的充填高度相差不大,只局部加载时各点的充填高度差较大,呈明显的波浪形,纵横筋充填不均匀。图 10 为不同加载方式时的等效应变云图。先局部后整体加载时,等效应变的最小值、最大值和平均值都比只采用局部加载时的小,变形较均匀。

图 11 为 2 种不同的加载方式下的流线分布。由图看出, 先局部加载后整体成形时的过渡区筋上的流线分布更合理一些, 主要是由于先局部加载后整体加载时, 局部加载步时由于变形量减小, 材料流动程度较小, 使得加载区对过渡区的影响程度减小。过渡区流线向未加载区的偏移程度减小。在后续的整体加载步时过渡区筋相当于挤压成形, 使得过渡区筋分布更合理。

图 12 为不同变形方式下的晶粒尺寸分布云图。由图看出, 只采用局部加载时, 晶粒尺寸的最大值和先局部加载后整体加载时的晶粒尺寸的最大值几乎相同, 但是只采用局部加载时晶粒尺寸的最小值明显较小。局部加载时, 晶粒尺寸的非均匀程度较小, 晶粒尺寸分布较均匀。

图 13 为不同加载道次时流线分布图。一个加载道次时, 过渡区筋呈明显的反“S”型, 2 个加载道次时,

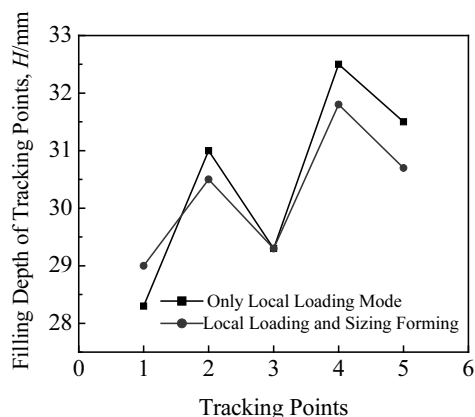


图 9 不同加载方式下各跟踪点的充填高度

Fig.9 Filling depth of tracking points under different loading modes

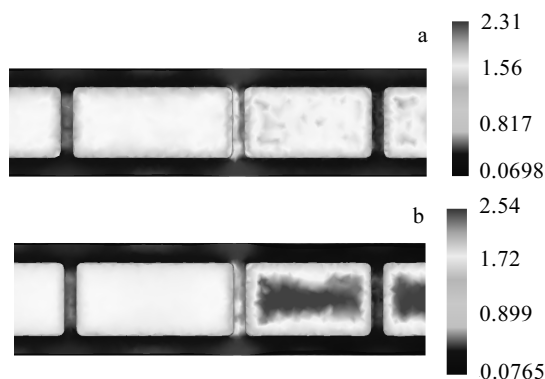


图 10 不同加载方式下等效应变分布

Fig.10 Distribution of equivalent strain under different loading modes: (a) local loading and sizing forming and (b) only local loading mode

过渡区筋的流线分布已发生明显的改善, 流线分布状况良好, 3 个加载道次时过渡区筋的流线分布和其他筋的基本没有区别。这是由于随加载道次的增加, 每一加载步时, 加载区的变形量减小, 过渡区下筋的充填高度较小, 且由于加载区和未加载区之间的转换使得第 1 道次完成后, 过渡区的上筋和下筋都充填了。

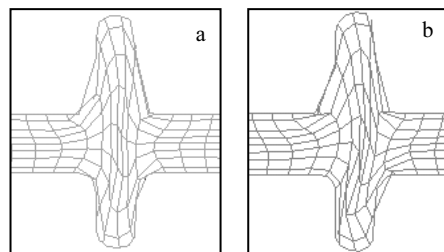


图 11 不同加载方式下 H 型构件的流线分布

Fig.11 Distribution stream line under different loading modes: (a) local loading and sizing forming and (b) only local loading mode

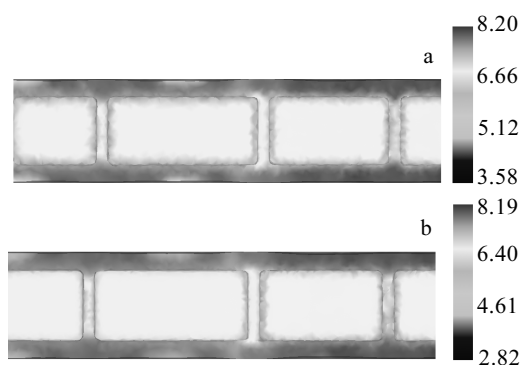


图 12 不同加载方式下 H 型构件晶粒尺寸分布

Fig.12 Distribution of primary α phase grain size (μm) under different loading modes: (a) local loading and sizing forming (b) and only local loading mode

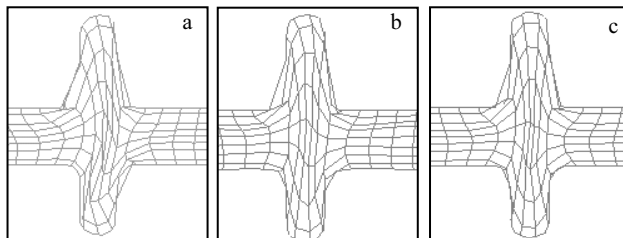


图 13 不同加载道次时 H 型构件的流线分布

Fig.13 Distribution of stream line under different loading passes: (a) one pass, (b) two passes, and (c) three passes

由于第 1 加载道次完成后筋的充填高度较小, 充填阻力较小, 在第 2 加载道次时已充填筋, 没有对过渡区材料产生钉扎作用。随加载道次的增多, 过渡区变形越来越均匀, 过渡区流线分布也越来越好。

4 加载次序对构件成形的影响

局部加载过程中, 由于在成形的每一阶段都只是局部区域受载成形, 整个工件加载次序有先有后。先加载区变形完成后, 未加载区开始加载, 后加载区加载过程中, 已变形区一直处于高温状态, 发生空烧。

图 14 为局部加载后锻件的初生 α 相晶粒尺寸分布云图, 图 15 为相同试验条件下的先加载区和后加载区的显微组织^[5]。由图 14 看出, 先加载区腹板初生 α 相晶粒尺寸约 $7.35 \mu\text{m}$, 横向筋初生 α 相晶粒尺寸约 $7.8 \mu\text{m}$, 纵向筋初生 α 相晶粒尺寸约 $7.3 \mu\text{m}$, 后加载区腹板初生 α 相晶粒尺寸为 $7.12 \mu\text{m}$, 横行筋的初生 α 相

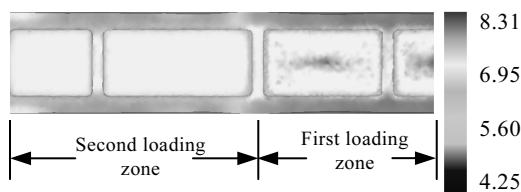


图 14 不同加载区初生 α 相晶粒尺寸分布云图

Fig.14 Distribution of primary α phase grain size (μm) under different loading zones

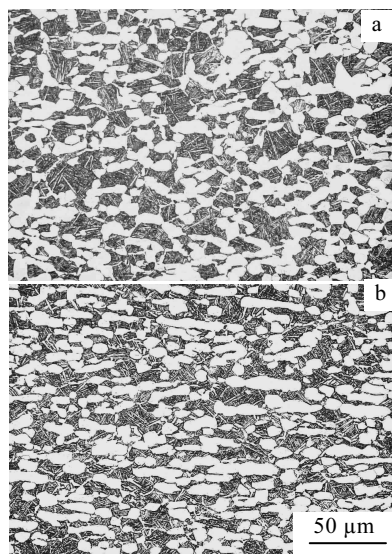


图 15 相同试验条件下局部加载的显微组织

Fig. 15 Microstructure after local loading forming: (a) first loading zone and (b) second loading zone^[5]

晶粒尺寸为 $7.7 \mu\text{m}$ 。纵向筋初生 α 相晶粒尺寸约 $7.2 \mu\text{m}$, 由此看出, 先加载区初生 α 相晶粒尺寸略大一些, 空烧对初生 α 相晶粒尺寸影响不显著。由图 15 看出, 测得先加载区的初生 α 相晶粒尺寸为 $8.1 \mu\text{m}$, 后加载区的初生 α 相晶粒尺寸为 $7.8 \mu\text{m}$ 。试验研究发现, 发生空烧的先变形区晶粒尺寸略大一些, 但空烧对初生 α 相平均晶粒尺寸影响并不显著。同时发现模拟结果和试验结果吻合良好, 说明本研究结果是可靠的。

5 结论

1) 分模面位置设在筋上时, 纵向筋和横行筋的充填较好, 平均晶粒尺寸分布较均匀, 分模面设在腹板上时, 易产生折叠等缺陷, 晶粒尺寸分布不均匀, 易产生混晶。

2) 相对于只采用局部加载成形, 先局部加载后整体精整使得变形更均匀, 筋的充填差较小并且流线分布更合理, 平均晶粒尺寸较大。

3) 加载参数对筋充填和初生 α 相晶粒尺寸的影响规律是: 只增大横向筋和腹板之间的圆角半径时, 横向筋和纵向筋的充填深度差较小, 同时增大横向筋和腹板, 纵向筋和腹板之间的圆角半径时, 纵向筋和横向筋之间的充填深度差变大; 随压下速度的增大, 筋充填分布越来越不均匀, 初生 α 相的晶粒尺寸的分布越来越不均匀。

4) 由于局部加载过程中, 先加载区发生空烧, 先加载区的晶粒尺寸比后加载区的略微大些, 但在两相区, 成形空烧对初生 α 相的晶粒尺寸影响不显著。

参考文献 References

- [1] Angshu S G, Avid F D. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 98: 189
- [2] Gao Shuangsheng (高双胜). *Research on Isothermal Local Loading Precision Technology of Rib 2 Web Forging Parts*(筋板类构件局部加载等温精密模锻工艺的研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003
- [3] Zhang S H, Wang Z R, Wang Z T et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 151(1~3): 39
- [4] Sun Zhichao, Yang He. *Steel Research Int*[J], 2008, 79(1): 601
- [5] Li Zhiyan(李志燕), Yang He(杨合), Sun Zhichao(孙志超) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(9): 1516
- [6] Shen Changwu(沈昌武). *Research on TC11 and TA15 Titanium Alloy Hot Deformation Constitutive Equation*(TC11 和 TA15 钛合金热变形材料本构模型研究)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007

- [7] Tang Ze(唐 泽). *Research on Microstructure Evolution Modeling and Application during Hot Deformation of TA15 Titanium Alloy* (TA15 钛合金高温变形组织演变模型与应
用研究)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008

H-Shaped Component Isothermal Local Loading Forming of TA15 Titanium Alloy

Sun Zhichao, Yang He, Li Zhiyan

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the DEFORM-3D software, a finite element model considering macro-micro forming of rib-web component isothermal local loading has been established. The forming process of H-shaped component and the effects of loading mode and sequence, position of die partition, and process parameters on the filling of ribs and primary α -phase grain size have been investigated. The results show that the position of die partition has a significant effect on the filling of rib, the rib will be filled better and the distribution of primary α -phase grain size is more uniform when the die is partitioned along the rib. Comparing with only by local loading forming mode and through local loading combining with sizing forming, the deformation is more uniform and the difference of filling depths between ribs is smaller with better distribution of streamline. Enlarging the fillet radius between rib and web, the rib is filled well and the filling depth difference between transverse and longitudinal ribs increases. With the increase of loading speed, the filling depth of rib decreases, and the primary α -phase grain size decreases, but the distribution of primary α -phase grain size is more non-uniform. But the loading sequence has little effect on primary α -phase grain size.

Key words: isothermal local loading; H-shaped component; grain size; TA15 titanium alloy

Biography: Sun Zhichao, Ph. D, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering,, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88460212-802, E-mail: zcsun@nwpu.edu.cn