

大型钛合金隔框等温闭式模锻成形工艺优化

孙念光, 杨 合, 孙志超

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 大型钛合金隔框锻件外形复杂, 且要求尺寸精度高、内部质量稳定, 然而在锻造过程中极易出现充填不满、折迭、流线紊乱等缺陷。针对这些成形缺陷, 基于 DEFORM 有限元软件, 采用数值模拟方法研究钛合金等温闭式模锻成形过程坯料和加载方式优化对锻件成形质量的影响。研究表明: 基于隔框材料流动特性优化得到的不等厚坯料, 能较好地改善材料的充填性, 使锻件满足尺寸精度要求。而局部加载方式可以有效地控制材料的流动, 提高锻件的变形均匀性, 消除由于材料流动不良造成的成形缺陷。

关键词: 钛合金; 隔框; 坯料优化; 加载方式; 成形缺陷; 数值模拟

中图分类号: TG319; TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)07-1296-05

随着航天、航空工业的迅速发展, 大型钛合金隔框结构件得到了越来越广泛的应用^[1]。为了满足减重的需要, 这类构件通常被设计成薄腹板并带有较高的内筋。构件外形复杂, 且要求尺寸精度高、内部质量稳定。这给构件成形带来极大的困难。钛合金常温下变形抗力大, 为了减小其变形抗力, 采用等温锻造技术^[2]。常规的锻造方法使得锻件必须有较大的余量, 为提高材料的利用率和减少机加工造成的流线切断和裸露缺陷, 采用闭式模锻成形技术^[3]。而钛合金等温闭式模锻成形工艺成为重要的研究方向。

大型钛合金隔框锻件成形过程中容易出现充填不满、折迭、流线紊乱等成形缺陷^[4]。充填不满主要影响精密锻件的尺寸精度。折迭容易使工件缺陷部位产生应力集中, 成为疲劳源。流线紊乱容易造成锻件组织分布不均匀, 影响锻件的整体性能。

材料变形由毛坯以及所受的应力状态决定。毛坯优化可以改善材料的充填性, 加载方式优化可以改变材料的受力状态, 控制材料的流动。加载方式主要有整体加载和局部加载两种, 目前国内外针对隔框锻件的研究主要集中于整体加载方式下模具、摩擦、预成形对成形质量的影响^[5,6], 而局部加载和坯料优化对材料流动和成形质量的影响报道较少。由于钛合金大型隔框锻件成形工艺的复杂性, 采用传统的经验试错法浪费大量人力物力, 不具可行性。随着计算机技术的飞跃发展和塑性成形理论的进步, 计算机数值模拟仿真由于其特有的优点已成为研究与发展塑性加工技术

的强有力工具。本文基于 DEFORM 软件平台, 采用数值模拟方法研究坯料和加载方式优化对成形质量的影响, 从而为复杂大型隔框锻件的成形提供理论依据和参考。

1 有限元模型的建立

本研究采用 UG 软件实现了坯料和模具的几何造型建模。隔框锻件为不规则近圆环形, 双面带筋, 且上筋和下筋完全对称。锻件的投影面积为 0.75 m², 质量为 130 kg。筋条的高宽比最大约为 6, 腹板最薄处厚度为 11 mm。此锻件的几何形状复杂, 尺寸大, 对其整体成形进行有限元模拟非常困难。根据几何外形的特点, 选取其典型部位进行研究, 如图 1a 所示。同时与下模模面接触的锻件部分更难成形, 故以此部分成形质量为研究对象, 如图 1b 所示。

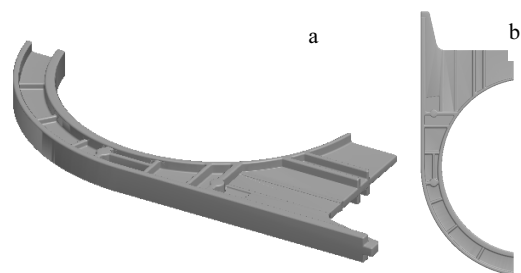


图 1 锻件三维造型图

Fig.1 Three-dimensional model of forging part: (a) schematic diagram of selected forming part and (b) diagram along -z axis

收到初稿日期: 2008-06-23; 收到修改稿日期: 2009-04-05

基金项目: 国防基础科研; 国家“863”计划(2006AA04Z135); 国家自然科学基金重点项目(50735005)

作者简介: 孙念光, 男, 1983 年生, 硕士研究生, 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88460212, E-mail: nevergiveup@nwpu.edu.cn

采用刚粘塑性有限元软件 DEFORM 建立等温闭式整体加载和局部加载成形刚粘塑性有限元模型，如图 2 和图 3 所示。考虑到模具的刚度远大于坯料，将模具作刚体处理。

在模拟中坯料材料选用 TA15 钛合金，模拟过程对坯料采用四节点四面体单元离散。材料的流动应力为锻造温度、应变速率和应变的函数，即 $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ ，相关数据取自文献[7]。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 °C，模具的压下速度取为 0.1 mm/s。

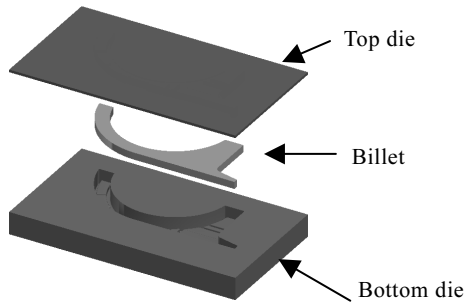


图 2 整体加载有限元模型

Fig.2 Finite element model of whole loading

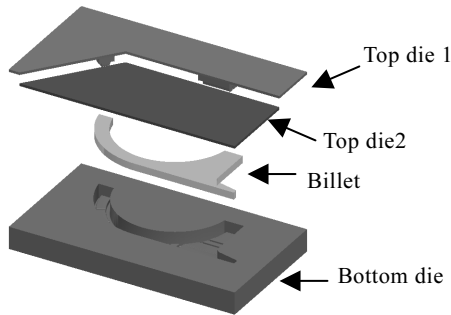


图 3 局部加载有限元模型

Fig.3 Finite element model of local loading

通过对隔框锻件成形过程分析，从坯料和加载方式优化两个角度提出改善锻件成形质量的模拟方案，见表 1。共提出 3 种坯料，坯料 A 为等厚板坯，坯料 B 和 C 为不等厚板坯，具体见图 4 和图 5。加载方式有整体加载和局部加载两种，见图 2 和图 3。局部加载方式上模模块由上模 1 和上模 2 组成，加载分为两个加载道次，图 6 所示为第 2 道次上模 2 加载完成时示意图。

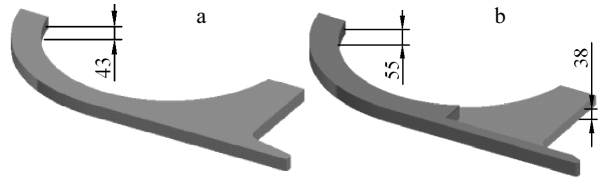


图 4 坯料示意图

Fig.4 Schematic diagram of billet: (a) billet A and (b) billet C

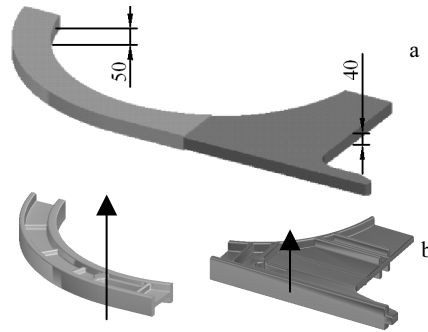


图 5 坯料 2 示意图

Fig.5 Schematic diagram of billet B: (a) difficult forming part and (b) easy forming part

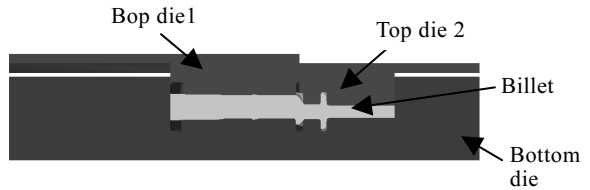


图 6 局部加载示意图

Fig.6 Schematic diagram of local loading

表 1 有限元模拟方案

Table 1 Program of FEM simulation

Simulative program	Billet	Forming process
No.1	Billet A	Whole loading
No.2	Billet B	Whole loading
No.3	Billet C	Whole loading
No.4	Billet B	Local lading
No.5	Billet C	Local loading

2 坯料优化对成形质量的影响

等温闭式模锻是一种无飞边锻造，材料在成形过程中几乎无消耗，这要求在工艺设计中必须严格控制坯料的体积和形状。针对这一过程隔框锻件材料的流动特点和模拟结果，提出了系列坯料优化方案。

2.1 坯料优化方案 1

根据等体积原理，若采用等厚坯成形，其厚度为 43 mm，如图 4a。图 7a 为下压量 23 mm 时的等效应变分布图。可知，纵向筋处变形大，而圆形筋处变形小。由图 7b 可知，此时沿加载方向的应力分布极不均匀，C-C 曲线对应区域沿加载方向应力值达到 366 MPa，继续下压可能此处压力高于模具的承受能力，导致此处模具损坏。

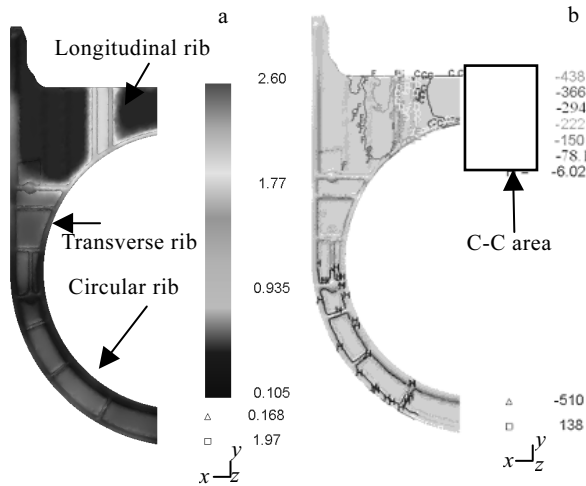


图 7 方案 1 下压量 23 mm 时的变量分布

Fig.7 Variable distribution of No.1 while die stroke is 23 mm: (a) effective stain and (b) stress distribution along loading direction

隔框锻件闭式模锻材料的流动特点决定了等厚坯成形后期沿加载方向应力的不均匀分布。锻压后期材料的流动如图 8 所示。由于纵向筋条 1 对材料流动的“钉扎”作用，1 区材料以纵向筋条 1 为界分形成两个近乎独立的充填区域。如图 8a 所示，对应于图 7b 所示 C-C 区材料基本不能穿过纵向筋条 1 向左侧区域流动。当 C-C 区材料充满型腔后，继续下压 C-C 区材料流动困难，导致 C-C 区沿加载方向应力迅速上升。

2.2 坯料优化方案 2

等厚坯料 A 充填性能不能满足尺寸精度要求，如图 9a 所示(云图数值为此时材料与模具型腔面的最小距离)环形筋成形质量很差，对预成形坯料进行进一步优化。对方案 1 速度图分析，如图 8b 所示锻压后期 2 区圆形筋和纵、横筋围成的封闭区域为独立的充填区域。坯料 B 以图 8 所示虚线分流线位置为分界线分成两部分，这两部分可看作相对独立的变形区域。分流线以下坯料部分对应锻件腹板厚度较小，筋条高度较大，在等厚坯成形过程为难成形区。分流线以上部分锻件成形相对易，为易成形区。据等体积原理得难成形区净成形所需坯料厚度为 48.6 mm，而易成形区

净成形坯料厚度为 40.2 mm。由于坯料厚度的不均一，锻压初期难成形区材料向易成形区流动。设定坯料 2 难成形区对应厚度为 50 mm，易成形区对应厚度为 40 mm，如图 5 所示。

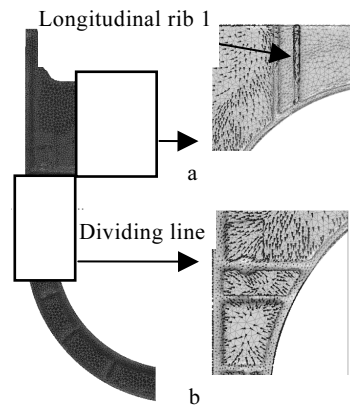


图 8 方案 1 速度图

Fig.8 Distribution of velocity field of No.1: (a) magnification of 1 area and (b) magnification of 2 area

经模拟分析，坯料 B 充填性能有所改善，如图 9b 所示，但仍存在充填不满区域。对坯料进一步优化，坯料 C 如图 4b 所示。坯料 C 对应锻件的充填质量能够满足精度要求，如图 10 所示。

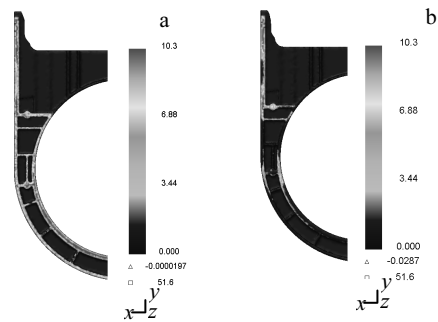


图 9 充填云图

Fig.9 Filling contour: (a) No.1 and (b) No.2

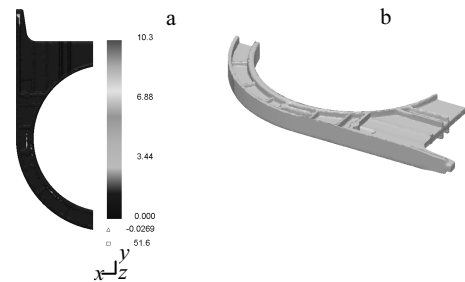


图 10 方案 3 充填云图

Fig.10 Filling contour of No.3: (a) filling chart and (b) schematic diagram of formed part

坯料优化可以改善坯料的充填性能，解决锻件充填不满的成形缺陷。如图 11 和图 12 所示。然而整体加载成形纵向筋条 1 与圆形筋的交接处存在着折迭缺陷，如图 13 所示。因为此处成形需要金属量较大，下压初期筋条交汇处得不到足够的金属充填，已成形的两条筋没有直接相连，继续下压两股金属沿着相互垂直的型腔侧壁流动，汇流形成折迭，同时在整体加载后期，在腹板和筋条的交汇部位非常容易产生穿流、涡流、流线紊乱等缺陷，如图 14 所示。

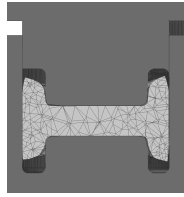


图 11 坯料 A 圆形筋成形图

Fig.11 Circular rib forming of billet A

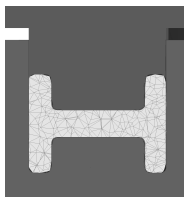


图 12 坯料 B 圆形筋成形图

Fig.12 Circular rib forming of billet B

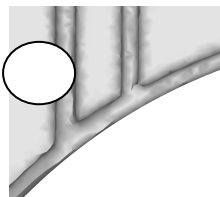


图 13 成形筋交汇折迭缺陷

Fig.13 Overlap at the intersecting point of rib

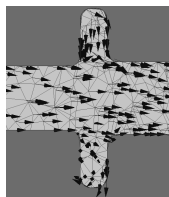


图 14 整体加载速度图

Fig.14 Distribution of velocity field of whole loading

3 加载方式对成形质量的影响

鉴于隔框锻件整体加载成形锻件的折迭、流线紊乱等质量缺陷，用数值模拟方法研究了局部加载对锻件成形质量的影响规律。

局部加载分两道次完成，具体过程为：上模 2 下压-上模 1 下压-上模 2 下压-上模 1 下压-精整。图 15 为整体加载和局部加载方式下的应变分布图。压下量为 29 mm 时，方案 2 整体加载应变平均值为 0.926，方案 4 局部加载应变的平均值 0.923。方案 2 整体加载应变最大值和最小值之差为 2.942，方案 4 局部加载应变最大值和最小值之差为 1.850。可知相同的压下量下，局部加载和整体加载方式下坯料变形量相差不大，而局部加载方式下材料变形均匀性更好。这说明采用局部加载方案更有利于金属的合理变形，终锻后得到的锻件内部变形分布更均匀合理。

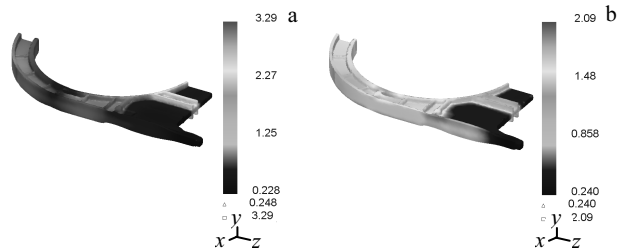


图 15 压下量为 29 mm 时的等效应变云图

Fig.15 Effective strain contour when the die stroke is 29 mm:

(a) No.2 and (b)No.4

局部加载可以改善材料的变形流动，较好地解决折迭等缺陷，纵筋和圆形筋的交汇处成形质量良好(图 16)。图 17 所示为最后加载阶段筋和腹板连接处的速度场，可以看出，采用局部加载可以控制材料的流动，使得流线沿着锻件的轮廓合理分布，消除折迭、穿筋等缺陷。

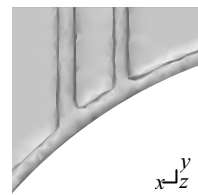


图 16 成形筋交汇处示意图

Fig.16 Schematic diagram of intersecting point of rib

对坯料和加载方式进一步优化，最终的优化方案为方案 5，即坯料选用坯料 C，加载方式为等温局部加载。

对模拟结果进行分析, 锻件的成形质量良好。充填不满缺陷已基本消除, 锻件的变形也比较均匀, 如图 18 和图 19 所示, 进而保证锻件内部流线和组织的均匀性, 所需变形力的合理性。



图 17 局部加载速度图

Fig.17 Distribution of velocity field of local loading

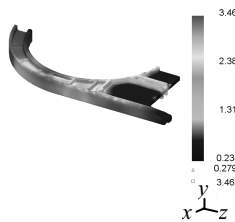


图 18 方案 5 等效应变云图

Fig.18 Effective strain contour of No.5

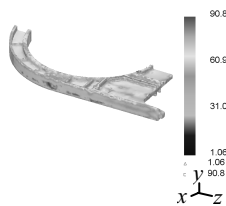


图 19 方案 5 等效应力云图

Fig.19 Effective stress contour of No.5

4 结 论

1) 不等厚制坯能够较好地解决隔框锻件成形过程充填不满的缺陷, 使精密锻件满足尺寸精度要求。

2) 通过设定合理的局部加载工艺参数, 能够提高变形的均匀性, 有效地解决了整体加载过程由于材料流动不合理造成的折迭、流线紊乱、穿筋等缺陷, 使流线分布合理, 提高锻件质量。

参考文献 References

- [1] Luo Songbao(罗松保). *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2003(6): 5
- [2] Qu Yinhua(曲银化), Sun Jianke(孙建科). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 1997, 14(1): 12
- [3] Zhang Hongwei(张宏伟). *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术)[J], 2003, 31(8): 32
- [4] Luo Renping(罗仁平). *Die and Mould Technology*[J], 1999(3): 84
- [5] Claudio R Boër. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1984, 26(5): 337
- [6] Si Changhao(司长号), Shan Debin(单德彬). *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2006, 14(3): 236
- [7] Shen Changwu(沈昌武). *Research on Material Constitution Models of TA15 and TC11 Titanium Alloys in Hot Deformation Process*(TA15 和 TC11 钛合金热变形材料本构模型研究) [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007

Optimization on the Process of Large Titanium Bulkhead Isothermal Closed-Die Forging

Sun Nianguang, Yang He, Sun Zhichao

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Titanium bulkheads are widely used in the aviation and aerospace industry. This kind of parts are very complex, and meet high requirements for dimensional precision and the stabilization of inner quality. Some defects would be produced during the forming process, such as unfilling, overlapping, and the disturbance of forging flow line. In this paper, the effects of billet optimization and loading conditions on the forming quality during titanium alloy bulkhead isothermal closed-die forming process have been investigated, based on the rigid-viscoplastic finite element code, DEFORM-3D. The results show that the filling of die cavity can be effectively improved by using the billet with unequal thickness, which is obtained by the analysis of material flow, as a result, the dimensional precision can be satisfied for these parts. The local loading can make the deformation more uniform and eliminate the defects caused by bad material flow. The results obtained could provide a guide for proper loading scheme determining bulkhead forming.

Key words: titanium alloy; bulkhead; billet optimization; loading condition; forming defects; numerical simulation

Biography: Sun Nianguang, Candidate for Master, School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88460212, E-mail: yanghe@nwpu.edu.cn