

TC4 钛合金框类零件热挤压数值模拟及工艺优化

林尧¹ 陈伟² 陈明和¹ 李枫¹

(1 南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

(2 苏州有色金属研究院,苏州 215026)

文 摘 为了获得 TC4 某框类零件热挤压成形工艺方案及其合适的工艺参数,利用有限元软件 Msc/superforge 对零件整体热挤压成形和分段热挤压成形两工艺方案进行数值模拟,得出:整体热挤压成形工艺所需挤压力过高,成形困难,不适合该零件;分段热挤压成形工艺所需挤压力低、成形状况良好适合该零件,并以初始挤压温度 920℃、挤压速率 3 mm/s 为成形的合适条件。

关键词 热挤压,TC4 钛合金,Msc/Superforge,数值模拟

Numerical Simulation and Process Optimization of TC4 Titanium Alloy Frame Part on Hot Extrusion

Lin Yao¹ Chen Wei² Chen Minghe¹ Li Feng¹

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Suzhou Institute for Nonferrous Metal, Suzhou 215026)

Abstract In order to obtain forming process scheme and suitable parameters for TC4 titanium alloy frame part, Msc/Superforge software was used in simulating overall hot extrusion and segment parts hot extrusion. The simulation results show that high extrusion force and difficulty in forming in overall extrusion process made it not suitable for this product, but low extrusion force in segment parts hot extrusion resulted in good shaping. This process is suitable for this product and the initial extrusion temperature 920℃, extrusion speed 3mm/s is better condition for it.

Key words Hot extrusion, TC4 titanium alloy, Msc/Superforge, Numerical simulation

0 引言

TC4 钛合金某框类零件由于其工作环境的特殊性,要求零件内部组织致密,金属成形流线分布合理,并能承受一定的强度。加工该零件传统上采用切削加工或者铸造成形。切削加工该零件费时费力破坏了金属成形流线,材料去除量大导致材料利用率低,且加工后的残余应力将导致零件变形。采用铸造成形该零件容易在内部组织产生缩空、缩松和气孔等缺陷使零件强度达不到要求,影响其承载能力。TC4 钛合金在常温下变形抗力大,成形困难,但是在高温下变形抗力大大降低。根据钛合金在高温下的特性,本文采用热挤压工艺成形该零件。该工艺可以减少机加余量,节省原材料,降低能耗,而且由于保留了金属成形流线及细化晶粒,零件力学性能有较大提高。

目前国内外研究者对数值模拟在挤压成形中的应用做了大量研究,Duan 等应用分析软件 FORGE2 和 FORGE3 对挤压工艺进行了数值模拟研究,在尺度效应、多孔模设计以及等温挤压的研究中发挥了重要作

用^[1-3]。Zhou 等利用有限元软件 DEFORM-3D 进行了挤压工艺的模拟,分析了铝合金 6061 和 7075 的整个挤压过程挤压载荷的变化规律,等温挤压以及挤压速率和型材温度的关系等,并且都通过了实验验证^[4-6]。王锐等利用自主开发的软件 AE-FVM 分析了典型薄壁铝型材挤压过程进行了模拟和模具优化^[7]。

钛合金热挤压属于三维大变形过程,成形过程中工件的弹性变形在整个变形中所占比例很小,所以一般采用刚塑性模型来进行模拟,忽略材料的弹性变形。金属塑性成形有限元模拟中,基于有限体积的 Euler 方法描述的固定空间,材料流动时网格并不变化,无论材料发生多大的变形,不需进行网格重化,这样很好的避免了网格再发分的问题。Msc/Superforge 是基于 Euler 有限体积法的有限元软件在模拟热挤压变形时采用的是刚塑性模型。本文运用该软件对某框类零件热挤压成形过程中的载荷曲线、温度场分布、等效应变分布等方面进行分析研究,评价工艺方案的可行性并得出适合的工艺参数^[8]。

收稿日期:2009-10-29

作者简介:林尧,1983 出生,硕士研究生,主要从事金属成形与数值模拟研究。E-mail:linyaofeifei30@163.com

1 某框类零件热挤压过程有限元模拟

1.1 热成形工艺与几何模型

图1为所要成形的模框类零件结构图长120 mm、宽93 mm、高12 mm,最小厚度4 mm。成形该零件分为两工艺方案:方案1,零件整体热挤压成形,由坯料反算得出坯料长90 mm、宽50 mm、厚11 mm(图2);方案2,零件由AA、BB面分为三部分,分别进行热挤压成形然后再用氩弧焊进行焊接。本文对方案2中最难成形部件图3进行热挤压模拟,坯料形状与模具型腔一致厚度为8 mm,图4为该部件模具图。

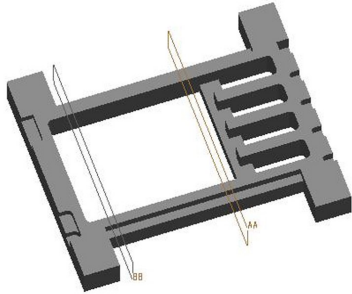


图1 某框类零件结构图

Fig1 Structure diagram of frame part

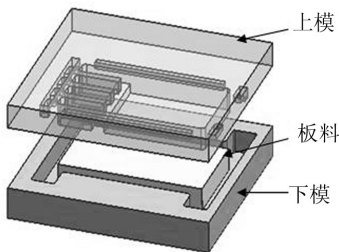


图2 整体热挤压成形模具图

Fig.2 Die structure drawing for overall hot extrusion

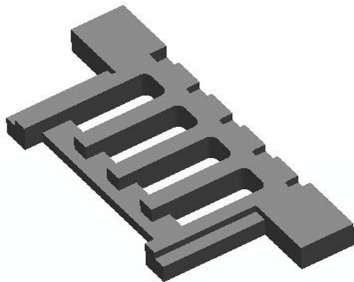


图3 难热挤压成形部件

Fig.3 Difficult hot extrusion part

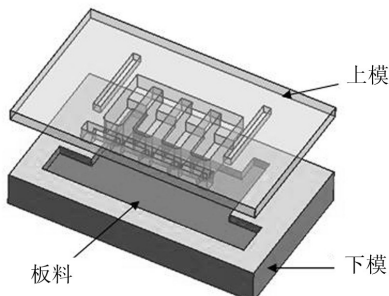


图4 分段热挤压成形模具图

Fig.4 Die structure drawing for segment parts hot extrusion

用PRO/E中建立模具和坯料的三维数值模型,再用stl格式导入Msc/Superforge软件中进行模拟。

1.2 材料的本构方程

材料本构关系模型是数值模拟的关键,它会对模拟模型的准确性和模拟精度产生直接影响。TC4合金属于应变速率敏感性材料,根据Msc/Superforge软件内置的本构关系类型,选用Hot Forging Material Form 2作为材料的本构关系模型,即

$$\sigma = \max[S, C \dot{\epsilon}^M]$$

式中, σ 为流动应力, S 为最小屈服应力, C 为应变速率常量, $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速率, M 为应变速率敏感性指数。

1.3 摩擦条件

外摩擦对挤压金属流动具有极大的影响,零件在热挤压过程中主要受到的是剪切摩擦力,随着外摩擦系数的增加金属流动不均匀程度增加。TC4钛合金一般用玻璃润滑剂润滑,毛坯与模具的摩擦因数为0.04~0.06^[9],模拟时取0.06。

1.4 挤压温度

变形温度对挤压力的影响,是通过变形抗力的大小反应出来的。随着温度的升高,坯料的变形抗力下降。从TC4合金的变形抗力、允许变形程度随温度变化的规律,以及从减少能量消耗和充分利用合金塑性的角度出发,初始挤压温度愈高愈好。初始挤压温度应为 β 转变温度以下14~28℃^[9],本文以920℃为坯料和模具的挤压温度。

1.5 挤压速率

变形速率也是通过变形抗力的变化影响挤压力。冷挤压时,挤压速率对挤压力的影响较小。热挤压中,当挤压过程中无温度、外摩擦等条件的变化时,挤压力和挤压速率之间呈线性关系。随着挤压速率的增加,所需的挤压力增加。热挤压时金属在变形过程中产生的硬化可以通过再结晶软化。但这种软化需要充分的时间进行。当挤压速率增加时,软化来不及进行,导致变形抗力增加,根据经验现以1 mm/s进行挤压模拟。

1.6 材料参数

Msc/Super Forge自带丰富的材料库,毛坯选择软件自带的TC4材料模型,模具选用H26材料模型。

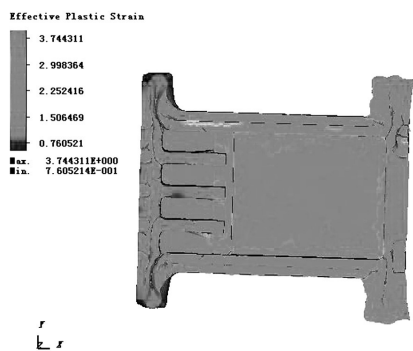
2 模拟结果对比分析

2.1 等效应变分布

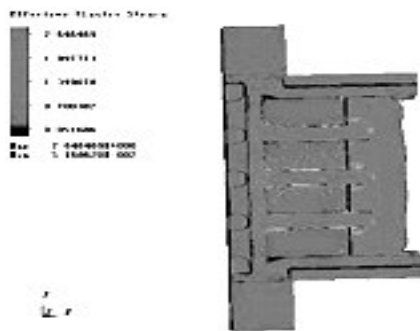
从图5(a)中可以看出零件成形状况非常不好。零件左侧结构复杂,流动阻力大,并没有成形完全,而且零件两侧出现了明显折皱。这是由于此处金属需求量最大,根据最小阻力定律,金属首先向间隙大的地方流动,拉动周边金属补充,加之流动速率较快,几股金属对流汇合而形成,这是工字形零件常易产生的缺陷。零件的应变主要集中在成形零件中部的两连

接杆上,成形时大量应变能消耗在镦粗毛坯上。图5

(b)零件成形状况良好,零件没有出现折皱等缺陷。



(a) 工艺方案1



(b) 工艺方案2

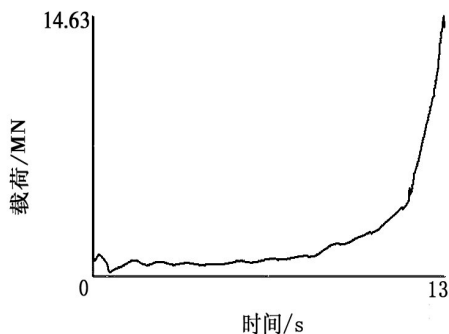
图5 零件等效应变图

Fig.5 Distribution of effective strain

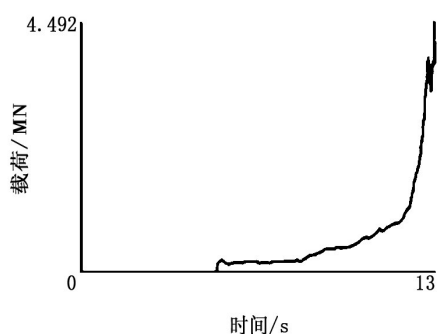
2.2 行程—载荷曲线

图6为热挤压过程中行程—载荷曲线,方案1中挤压开始阶段坯料被镦粗挤压力变化很小。随着下压量的加大,毛坯与模具的接触面积不断增大,摩擦阻力不断加大。由于模具结构复杂,金属的流动变得

越来越困难,死区金属不断增多,使得最后阶段所需成形载荷几乎成直线上升。所需最高载荷达到 1.463×10^7 N,这是现有实验设备所不能达到的。方案2最高压力为 4.492×10^6 N 现有实验设备可以达到该条件。



(a) 工艺方案1



(b) 工艺方案2

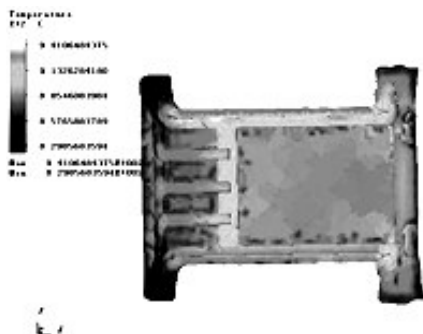
图6 行程—载荷曲线

Fig.6 Load-stroke curve

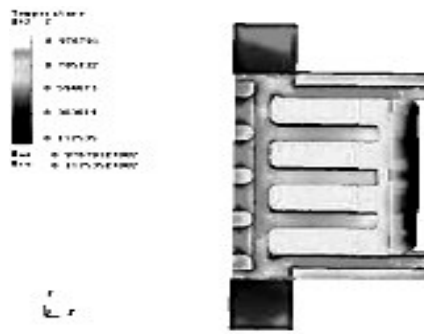
2.3 温度分布

从模拟过程温度变化(图7)可以看出方案1成形

过程中温度缓慢增加,最高为941℃。方案2成形过程中温度缓慢降低,成形完成时最高温度为897℃。



(a) 工艺方案1



(b) 工艺方案2

图7 温度分布图

Fig.7 Distribution of temperature

这是由于挤压速率较慢,零件成形时塑性变形和摩擦生成的热量少于零件与周围大气环境进行热交换损失的热量,从而导致零件温度下降,所需的挤压力增加。综上可以看出,工艺方案1挤压出的零件成形困难,所需挤压力过高,该方案不适合挤压该零件。

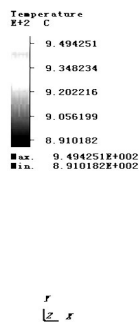
方案2成形状况良好,但是挤压速率过慢导致温度降低,挤压力上升,该方案还有着一定的缺陷。

3 工艺方案2的优化

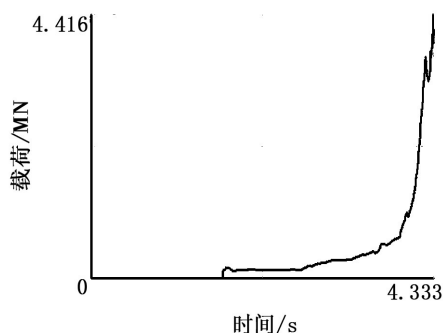
针对分段热挤压成形工艺挤压速率过慢导致零件温度上升的缺点,现在以挤压速率3、5 mm/s对方

案2进行模拟。图8~图9中可以看出以5 mm/s的挤压速率所需的挤压力最高为4.513 MN,成形后的最高温度达到了967℃。TC4钛合金为两相钛合金,当挤压温度超过合金的 β 转变温度时, $(\alpha+\beta)$ 晶粒向 β 晶粒转变, β 晶粒剧烈长大,挤压成形后将形成魏氏组织。在力学性能上的反映是零件的室温塑性很低,达不到技术条件要求。以3 mm/s的挤压速率所

需的挤压力最小的为4.416 MN,主要是因为挤压时的塑性变形产生的热量基本和零件与周围环境进行热交换所消耗的大致相同,零件温度基本保持不变,该挤压速率下坯料有一定的时间进行热软化。所以以3 mm/s的挤压速率既减小了成形所需的挤压力又提高了生产率,而且成形最高温度低于 β 转变温度,零件组织为 $(\alpha+\beta)$ 钛合金力学性能良好。



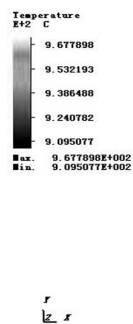
(a) 温度分布图



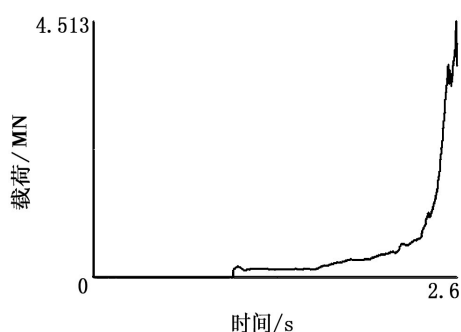
(b) 行程—载荷曲线

图8 以3 mm/s挤压时温度分布图和行程—载荷曲线

Fig. 8 Distribution of temperature and load-stroke curve at velocity of 3 mm/s



(a) 温度分布图



(b) 行程—载荷曲线

图9 以5 mm/s挤压时温度分布图和行程—载荷曲线

Fig. 9 Distribution of temperature and load-stroke curve at velocity of 5mm/s

4 结论

(1)运用有限元软件 Msc/Superforge 模拟了整体热挤压成形和分段热挤压成形两工艺方案成形过程。从模拟得出的零件等效应变分布、温度场变化、载荷曲线可以看出整体热挤压成形该零件,将出现折皱,零件成形困难等缺陷,该工艺方案不可取;分段热挤压成形效果良好,适合制造该零件。

(2)通过模拟优化分段热挤压工艺,得出以挤压温度920℃,挤压速率3 mm/s为成形该零件的合适条件。

参考文献

- [1] Duan X J, Velay X, Sheppard T. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys [J]. Mater. Sci. and Eng. A, 2004, 369: 66
- [2] Peng Z, Sheppard T. Individual influence of forming parameters on surface recrystallization during aluminium extrusion [J]. Modeling Simul. Mater. Sci. Eng., 2004, 12: 43
- [3] Peng Z, Sheppard T. Simulation of multi-hole die extrusion [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2004, 367: 329
- [4] Zhou J, Li L, Duszczyc J. 3D FEM simulation of the

whole cycle of aluminium extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian approach [J].

- J. Mater. Proc. Tech., 2003, 134: 383
- [5] Chanda T, Zhou J, Duszczyc J. A comparative study on iso-speed extrusion and isothermal extrusion of 6061 Al alloy using 3D FEM simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 114: 145
- [6] Li L, Zhou J, Duszczyc J. Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminium alloy at various ram speeds by means of 3D FEM simulation [J]. J. Mater. Proc. Tech., 2004, 145: 360
- [7] 王锐,赵国群,娄淑梅,等. 铝型材挤压过程非正交网格有限体积法数值模拟与模具优化设计[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 617-621
- [8] 卞 A, 尼克里斯基. 钛合金的模锻与挤压[M]. 北京: 国防工业出版社. 1982
- [9] 蔡军,李付国,任东升,等. TC4合金叶片热模锻过程的数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(6): 15-25

(编辑 任涛)