

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.007

TC4 钛合金自由锻过程相变模拟与工艺分析

徐新生^{1,2}, 闫俊霞^{1,2}, 何雪明^{1,2}, 张皓晔³

(1. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 无锡宏达重工股份有限公司, 江苏 无锡 214122)

摘 要:为了揭示 TC4 钛合金自由锻过程中相的演变规律, 课题组建立了 TC4 钛合金的相变模型, 对其成形工艺进行数值模拟, 并利用平均值和标准差值作为评价指标, 对模拟结果进行分析。结果显示: 温度在 700 ℃ 左右时, α 相开始向 β 相发生转变, 当达到 1 000 ℃ 后, 转变率达到 100.0% 直至加热结束; 锻粗的最佳高径比为 2.5, 锻件对应的平行边距 $D = 410$ mm; 锻件与模具接触处形成温度骤降区, 首先发生 β 相到 $\alpha + \beta$ 相的转变, 2 相占比平均值呈相反演变趋势, 标准差值为相同演变趋势。基于模拟的锻造工艺, 能够有效地缩短试验周期, 提高产品合格率, 本研究为大型钛合金自由锻工艺提供了参考。

关 键 词: TC4 钛合金; 相变模型; 标准差; 高径比; 温度骤降区

中图分类号: TG316.2; TH142 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2022)03-0043-07

Phase Transformation Simulation and Process Analysis of TC4 Titanium Alloy in Free Forging Process

XU Xinsheng^{1,2}, YAN Junxia^{1,2}, HE Xueming^{1,2}, ZHANG Haoye³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
3. Wuxi Hongda Forging Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to reveal the phase evolution law of TC4 titanium alloy in the free forging process, the phase transformation model of TC4 titanium alloy was established, the forming process was numerically simulated, and the simulation results were analyzed by using the average value and standard deviation as evaluation indexes. The results show that when the temperature is about 700 ℃, α phase start direction β when the temperature reaches 1 000 ℃, the transformation rate reaches 100% until the end of heating; the optimum height diameter ratio of upsetting is 2.5, and the corresponding parallel edge distance of forging is $D = 410$ mm; a sudden temperature drop zone is formed at the contact between the forging and the die, which occurs first β phase to $\alpha + \beta$ phase for phase transformation. The average value of two-phase proportion shows the opposite evolution trend, and the standard deviation shows the same evolution trend. The forging process based on simulation can effectively shorten the test cycle and improve the qualified rate of products. The study provides a reference for the free forging process of large titanium alloy.

Keywords: TC4 aluminum alloy; phase transition model; standard deviation; height diameter ratio; temperature drop zone

TC4 钛合金(名义成分为 Ti-6Al-4V)是一种 $\alpha + \beta$ 型 2 相合金, 相变点以上主要是 β 相, 相变点以下为 $\alpha + \beta$ 相。该合金由于具有良好的机械性能、热强度和抗腐蚀性被广泛应用于航空、航海领域^[1-2]。锻造是钛合金构件的主要加工方法之一, 而锻件的性能与其微观组织演变密切相关, 因此研究锻件成

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275210); 国家自然科学基金资助项目(51975251); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(FMZ2018Y2); 江苏省产学研联创项目(1078081606192480)。

第一作者简介: 徐新生(1996), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要研究方向为金属锻造工艺。E-mail: 2443184912@qq.com

型过程中微观组织的演变就显得尤为重要^[3]。到目前为止,国内外学者对 TC4 合金的相变行为进行了一系列的研究。权国辉等^[4-5]构建了 TC4 钛合金大型模锻件二梁的晶粒和相的时空演变模型,模拟仿真了整个工艺过程中微观组织的演变历程,为大型钛合金零件的锻造提供了参考。Luo 等^[6]提出了一种嵌入相变模型的三维有限元方法,预测了 Ti-6Al-4V 涡轮叶片热锻及后续空冷过程中的相变特性,最后通过实验验证了仿真结果的正确性。Bruschi 等^[7]³⁸²基于 Avrami 相变的数学理论模型,采用有限元法研究了 TC4 叶身截面热锻及其冷却过程中各相的演变规律。Quan 等^[8]建立了基于多场耦合和多尺度耦合的有限元分析模型,对不同应变速率和温度下的压缩进行了模拟,并通过观察微观组织验证了有限元分析的正确性。

然而现阶段国内学者对钛合金自由锻过程中相演变规律的研究甚少,尤其在数值模拟方面,仍需展开进一步研究。课题组基于 Deform-3D 软件平台,建立了 TC4 合金的相变模型,对 TC4 钛合金现有自由锻工艺进行有限元仿真,验证工艺的合理性并预测钛合金锻件温度及各相的分布,以期大型钛合金零件的锻造提供参考。

1 模型建立

1.1 材料参数

数值模拟中,材料参数的准确性和完整性是决定仿真结果可靠性的关键因素之一^[9]。TC4 钛合金的化学成分见表 1,将其导入 JmatPro 材料性能模拟软件计算得到其性能参数,在 Deform-3D 中建立对应的材料数据库,相关的热物性参数如图 1 所示。

表 1 TC4 的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 %

V	Al	Fe	O
3.500 ~ 4.500	5.500 ~ 6.800	≤0.300	≤0.200
C	N	H	Ti
≤0.080	≤0.050	≤0.015	余量

1.2 建立有限元模型

采用 Deform-3D 对自由锻过程进行数值模拟。利用 UG 三维软件对模具和坯料进行实体建模,有限元模型如图 2 所示。采用刚粘塑性有限元法进行数值模

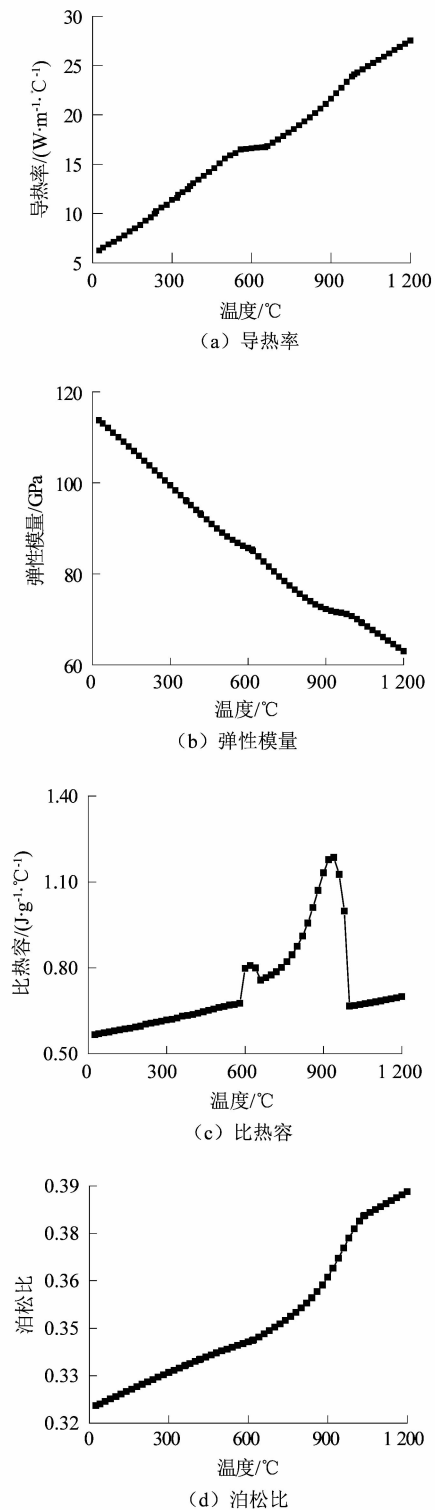


图 1 TC4 的热物性参数

Figure 1 Thermophysical parameters of TC4

拟,将坯料定义为塑性体,模具定义为刚性体^{[10]123}。其中,模具参与锻造过程的换热,具体模拟参数如表 2 所示。

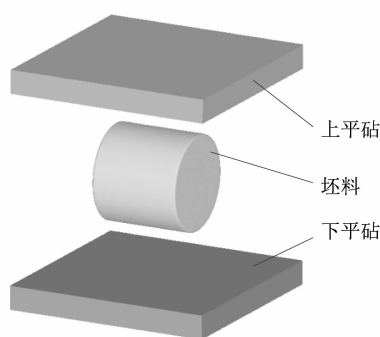


图2 TC4 钛合金自由锻有限元模型

Figure 2 Finite element model of TC4 titanium alloy free forging

表2 模拟参数

Table 2 Simulation parameters

坯料初始 温度/℃	模具初始 温度/℃	环境 温度/℃	上平砧速度/ (mm · s ⁻¹)
1 150	400	20	20
传热系数/ (W · m ⁻² · °C ⁻¹)	摩擦 因数	坯料直径 Ø/mm	坯料厚度/ mm
20	0.3	600	560

1.3 建立相变模型

1.3.1 加热阶段相变模型

TC4 钛合金在室温平衡状态下的显微组织由密排六方结构的 α 相和体心立方结构的 β 相构成,加热过程中 α 相会向 β 相转变,采用简化 Avrami 模型计算 α 相向 β 相转变的体积分数^{[11]82}。公式如下:

$$\xi_v = 1 - \exp \{ A [(T - T_s) / (T_e - T_s)]^D \}. \quad (1)$$

式中: ξ_v 为 α 相转变为 β 相的体积分数; T_s 为相变起始温度,取 600 °C; T_e 为相变结束温度,取 980 °C; A 和 D 为材料参数,分别取 -1.86 和 4.35。

根据 JMatPro 数据库提供的实验曲线,Avrami 数学模型数据与其对比结果如图 3 所示,二者 α 相转变体积分数随温度变化的趋势基本一致,验证了模拟结果的正确性,可以预测 TC4 合金微观相变的演变趋势^[12]。

1.3.2 冷却阶段相变模型

冷却过程中,根据 α 相生成阶段的不同,分为以下 3 种:初生 α 相、次生 α 相及时效 α 相,其中次生 α

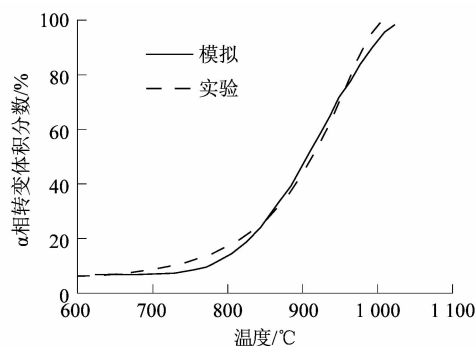


图3 实验数据与 Avrami 数学模型数据对比

Figure 3 Comparison between experimental data and Avrami simplified model data

相、时效 α 相和时效 β 相被称为转变 β 组织即 $\alpha + \beta$ 相^[13]。笔者结合 TC4 的 TTT 相变曲线(见图 4)和 JMA 模型实现了对 β 相到 $\alpha + \beta$ 相转变的模拟^[14]。相变的起始点和结束点由 TTT 曲线来控制, β 相转变的体积分数由 JMA 模型计算。公式如下:

$$\xi = 1 - \exp(-bt^n). \quad (2)$$

式中: ξ 为 β 相转变为 α 相的体积分数, b 为 TTT 曲线计算的常数, n 取 1.35。

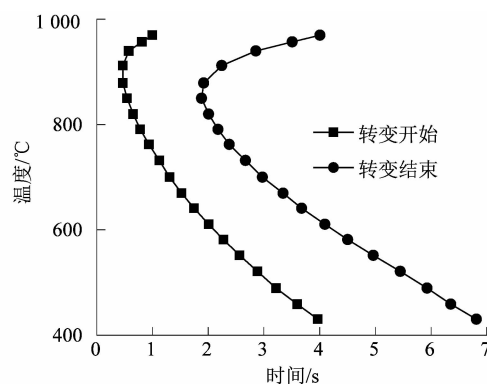


图4 TC4 钛合金的 TTT 相变曲线

Figure 4 TTT transformation curve of TC4 titanium alloy

1.4 确定工艺参数

TC4 钛合金自由锻造工艺锻前热处理工艺如图 5 所示。图 6 所示为镦拔工艺流程图,坯料先进行拔长,镦粗前先进行倒八方,主要为了防止出现应力集中现象^[16]。由于涉及多工序模拟,因此仿真过程中,工件的初始条件(几何形状、温度场和相的分布)均由上一工序的计算结果导入,以确保模型的准确性。

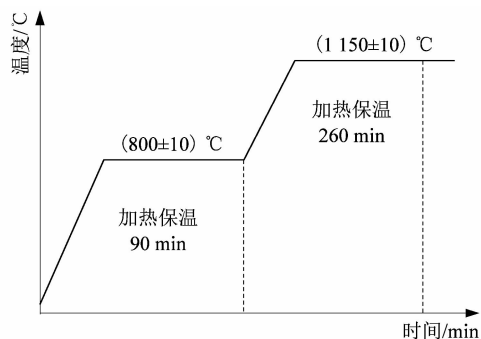


图5 锻前热处理曲线

Figure 5 Heat treatment curve before forging

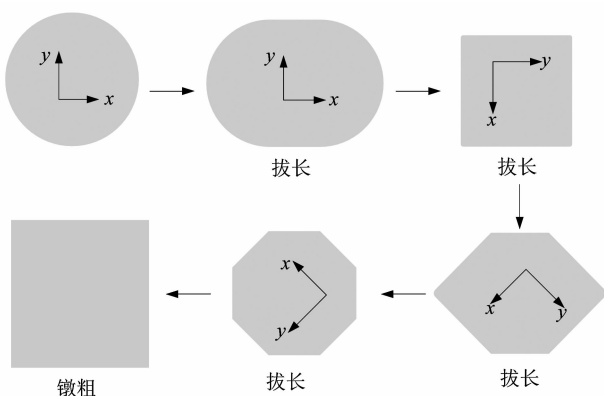


图6 锻拔工艺流程

Figure 6 Upsetting and drawing process flow chart

2 模拟结果及分析

2.1 加热过程分析

在坯料中心截面处选取 P_1, P_2, P_3, P_4 和 P_5 作为追踪点,追踪点分布如图7所示,各点温度和相随时间的变化如图8所示。可以看出,温度在径轴方向上呈现相同的变化趋势,均由表面向内部逐渐转移。 α 相

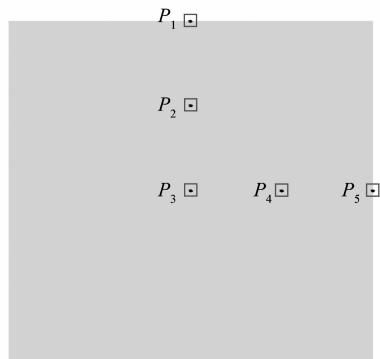
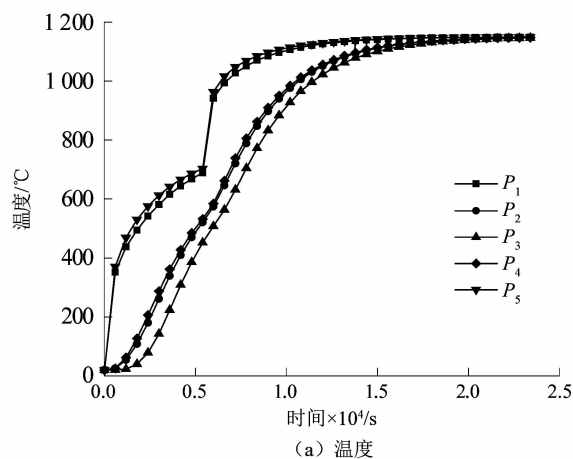


图7 追踪点分布

Figure 7 Distribution of tracking points

在 700 °C 左右开始向 β 相发生转变,两相在各点处的体积分数呈现截然相反的演变趋势。点 P_1 和 P_5 处于坯料表面,温升最快,首先发生 α 相到 β 相的转变。点 P_3 处于坯料心部,规律与 P_1 和 P_5 相反。各点在温度达到 1 000 °C 左右时, α 相向 β 相的转变率均达到 100.0%。结果与理论相符^{[7]385}。



(a) 温度

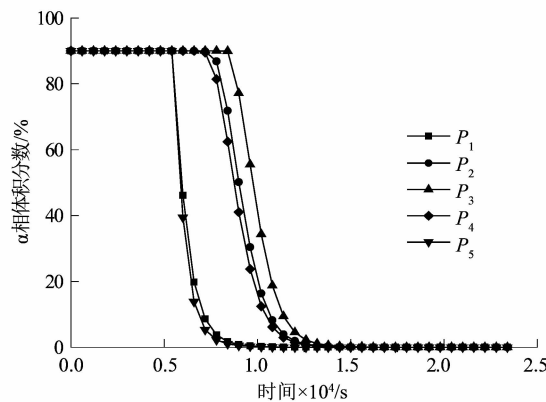
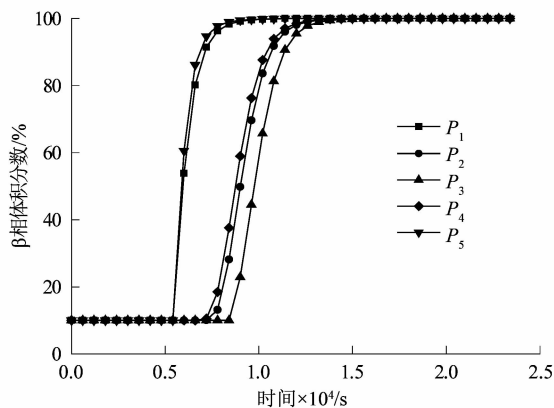
(b) α 相体积分数(c) β 相体积分数

图8 追踪点处温度和相体积分数随时间变化

Figure 8 Variation of temperature and phase integral number at tracking points with time

2.2 锻拔过程分析

2.2.1 工艺分析

现有工艺中,锻件 2 平行边距设为 L ,拔长后 $L = 380 \text{ mm}$,数值模拟显示,坯料出现双鼓形缺陷,由文献[17]第 130 页知高径比是锻粗工艺的主要影响因素之一。通过模拟研究将现有工艺 L 增加至 410 mm 后产生最佳效果,锻件高径比由 2.9 减小至 2.5,对比效果如图 9 所示,后续锻粗时高径比均为 2.5。

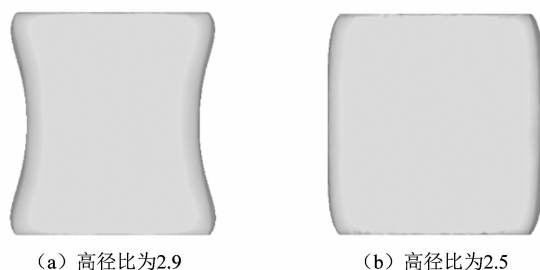


图 9 不同高径比对比

Figure 9 Comparison of different height diameter ratios

2.2.2 相变分析

图 10 所示为锻拔后坯料中心截面处温度的分布云图。可以看出,坯料中心温度达到最高,比初始温度 1150°C 高出 $10 \sim 20^\circ\text{C}$,该结果主要是由于锻拔过程中心区域的变形更剧烈,内部熵增最大。同时,由于模具与坯料间存在较大温差,成形时接触换热迅速,使得接触部位形成温度骤降区,区域内温度整体较低,第 2 次锻粗后产生最低温度值为 702°C 。虽然区域内温度较低,但受影响的坯料仅有表面很薄的一层,对整个成型过程的影响不大。

图 11 所示为锻拔后坯料中心截面处 β 相的分布云图。可以看出,锻拔后坯料 β 相体积分数在表面的分布几乎为 0,而且内部的 β 相几乎没有向 $\alpha + \beta$ 相转变。结合图 10 温度场分析可知,现象产生的主要原因是由于坯料和模具接触处形成温度骤降区,区域内温度达到 $\beta/(\alpha + \beta)$ 相变点以下,使得高温 β 相向 $(\alpha + \beta)$ 相转变,而坯料内部温度均高于相变点,并未发生转变。

图 12 所示为锻拔后坯料中心截面处 $\alpha + \beta$ 相的分布云图。由图可得,锻拔后坯料的 $\alpha + \beta$ 相分布与

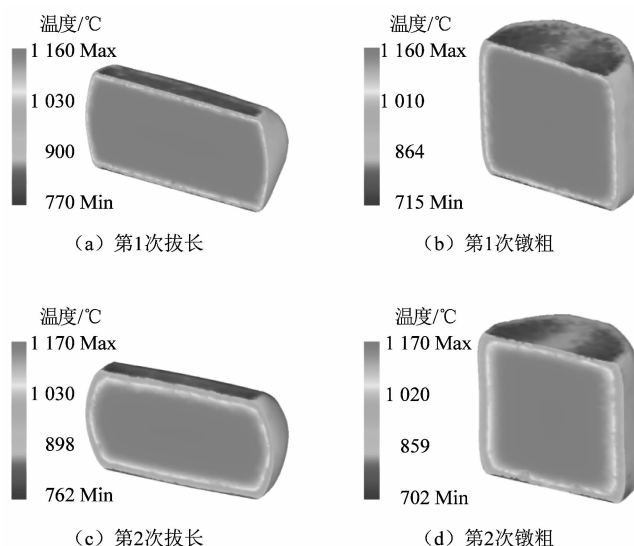


图 10 坯料中心截面处温度云图

Figure 10 Temperature nephogram at central section of blank

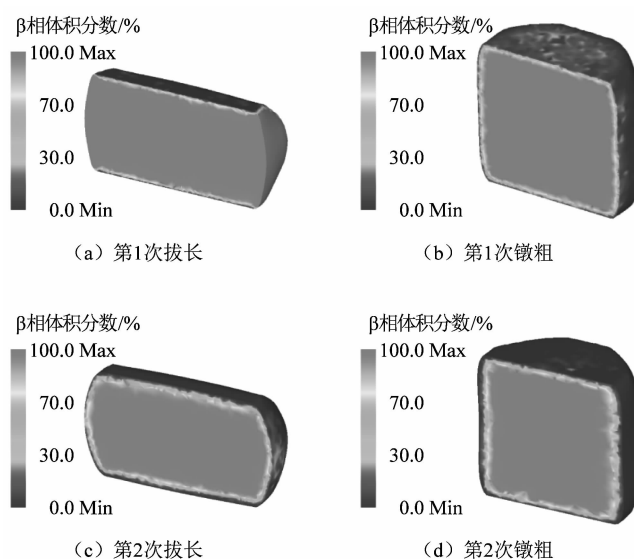


图 11 坯料中心截面处 β 相云图

Figure 11 β phase nephogram at central section of blank

图 11 所示 β 相分布截然相反,在坯料表面 $\alpha + \beta$ 相的分布率几乎为 100.0% ,其余部分则几乎没有发生转变。

2.3 评价指标

选取平均值和标准差值作为评价指标来表示温度和相在不同锻拔阶段的总体水平和均匀性,其中标准差值越小表示分布越均匀,表达式如下:

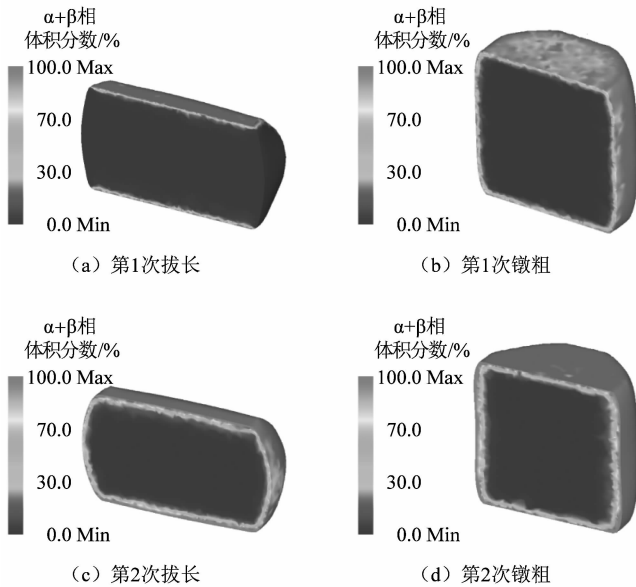


图12 坯料中心截面处 $\alpha + \beta$ 相云图
Figure 12 $\alpha + \beta$ phase nephogram at central section of blank

$$T_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N T_i / N; \quad (3)$$

$$T_{\text{sd}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{avg}})^2 / N}. \quad (4)$$

式中: T_{avg} 、 T_{sd} 分别为温度的平均值和标准差值, T_i 为节点*i*处的温度, N 表示节点总数。

图13所示为坯料温度的平均值和标准差值在不同工步处的变化(工步1为第1次拔长,工步2为第1次镦粗等),整个锻造过程中 T_{avg} 持续下降,工步1后 T_{avg} 由1150℃速降至980℃,主要是因为模具与坯料初始温差最大,坯料整体温度也会随之降低。而由于工步2和工步4为镦粗过程,坯料心部的剧烈变形会产生温升现象,同时坯料与模具、环境同时进行换热,在2个因素的相互作用下导致 T_{avg} 下降比较缓慢。 T_{sd} 在整个过程浮动不大,温度分布较为均匀。

取公式(3)和(4)计算 β 相和 $\alpha + \beta$ 相体积分数的平均值和标准差值,分别表示为 $f_{\text{avg},(\beta)}$ 与 $f_{\text{sd},(\beta)}$ 和 $f_{\text{avg},(\alpha+\beta)}$ 、 $f_{\text{sd},(\alpha+\beta)}$,结果如图14和15所示。从图14~15可以看出 $f_{\text{avg},(\beta)}$ 、 $f_{\text{sd},(\beta)}$ 呈现相反的演变趋势,随着锻造进行, $f_{\text{avg},(\beta)}$ 从100.0%下降到31.2%, $f_{\text{sd},(\beta)}$ 持续上升到68.8%,这与 T_{avg} 的演变规律一致;相反, $f_{\text{sd},(\beta)}$ 与 $f_{\text{sd},(\alpha+\beta)}$ 呈现出相似的演变趋势,均在40.0%上下浮动,与 T_{sd} 的演化相似。

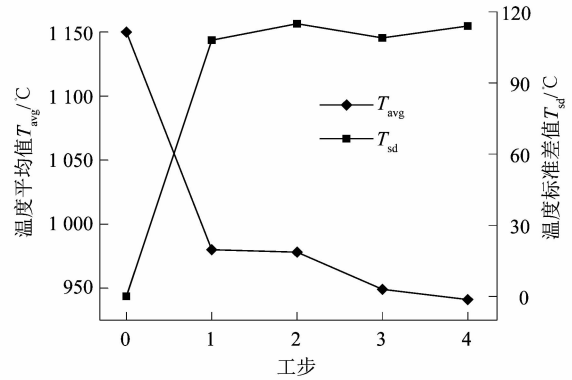


图13 温度平均值和标准差值随工步变化
Figure 13 Variation of temperature average value and standard deviation with work step

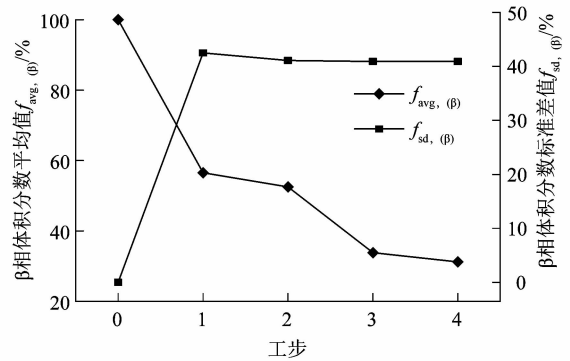


图14 β 相体积分数平均值和标准差值随工步变化
Figure 14 Variation of average value and standard deviation of β phase volume fraction with work step

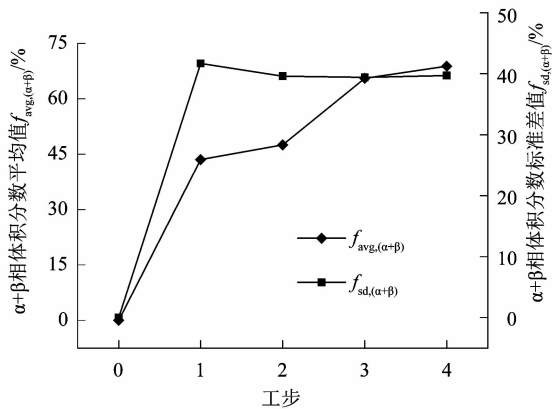


图15 $\alpha + \beta$ 相体积分数的平均值和标准差值随工步变化

Figure 15 Variation of average value and standard deviation of $\alpha + \beta$ phase volume fraction with work step

3 工艺验证

通过模拟得出,镦粗比越大,对应的拔长比就越大,越易导致坯料表面折叠、开裂及双鼓形等缺陷。该 TC4 钛合金镦粗时的高径比由 2.9 优化为 2.5,此时锻件对应的平行边距 $L=380\text{ mm}$ 增加至 $L=410\text{ mm}$ 。工艺流程为:下料-天然气室式炉加热-自由锻(镦拔)-修磨,试制后如图 16 所示。结果表明:产品各项性能指标符合要求,锻件未出现双鼓形缺陷,减少了对后续加工的影响。



图 16 TC4 钛合金自由锻试件

Figure 16 Specimen of TC4 titanium alloy free forging

4 结论

课题组通过建立 TC4 钛合金相变模型,对现有自由锻工艺进行数值模拟,得到以下结论:

1) TC4 钛合金的相变主要和温度分布相关,700 ℃ 时 α 相向 β 相发生转变,当温度达到 1 000 ℃ 以上时,转变率达到 100.0%。

2) 锻件与模具接触处形成温度骤降区,首先发生 β 相到 $\alpha + \beta$ 相的转变,整个过程 $f_{\text{avg},(\beta)}$ 从 100.0% 下降至 31.2% $f_{\text{avg},(\alpha + \beta)}$ 持续上升至 68.8%,呈现相反的演变趋势。 $f_{\text{sd},(\beta)}$ 与 $f_{\text{sd},(\alpha + \beta)}$ 则均在 40.0% 上下浮动。

3) TC4 钛合金自由锻镦粗时的最佳高径比为

2.5,锻件对应的平行边距 $L=410\text{ mm}$ 。通过试制,采用反复镦拔工艺能为后续加工提供合格锻件,有效的缩短试验周期,提高了产品合格率。

参考文献:

- [1] 马蕊侠,史栋刚,韩栋,等. Ti6Al4V 钛合金自由锻造板坯的显微组织及力学性能[J]. 热加工工艺,2016,45(11):25-28.
- [2] 谭金花,孙荣禄,牛伟,等. TC4 合金激光熔覆材料的研究现状[J]. 材料导报,2020,34(15):15132-15137.
- [3] 陈飞,朱华佳,李佳航,等. 大锻件非连续热变形组织演变宏观模拟[J]. 塑性工程学报,2020,27(5):41-52.
- [4] 权国辉,白玲. TC4 钛合金热锻双相及晶粒时空演变分析[J]. 模具工业,2020,46(10):57-61.
- [5] QUAN G H, ZHAO X Y. Analysis on phases and grain evolution of TC4 Ti-alloy in hot forming in time and space based on deform-3D[J]. Key Engineering Materials,2016,703:56-60.
- [6] LUO S Y, LI J, YU F P. Numerical analysis of phase transformation characteristics in hot forging and subsequent air cooling processes of Ti-6Al-4V turbine blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,106(3/4):1521-1532.
- [7] BRUSCHI S, BUFFA G, DUCATO A, et al. Phase evolution in hot forging of dual phase titanium alloys: experiments and numerical analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes,2015,20:382-388.
- [8] QUAN G Z, LUO G C, LIANG J T, et al. Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti-6Al-4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range[J]. Computational Materials Science,2015,97:136-147.
- [9] 王林春,吴永强,王开坤,等. 3Cr2NiMo 钢模块锻后热处理的数值模拟[J]. 金属热处理,2021,46(3):184-190.
- [10] 谢水生,李雷. 金属塑性成形的有限元模拟技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2008:123.
- [11] 罗石元. 汽轮机 TC4 钛合金大型复杂叶片精密热锻成形基础研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017:82.
- [12] DUCATO A, FRATINI L, MICARI F. Prediction of phase transformation of Ti-6Al-4V titanium alloy during hot-forging processes using a numerical model[J]. Journal of Materials: Design and Application,2014,228(L3):154-159.
- [13] 辛社伟,赵永庆. 钛合金固态相变的归纳与讨论(VI)-阿尔法[J]. 钛工业进展,2013,30(4):1-8.
- [14] QUAN G Z, PAN J, ZHANG Z H. Phase transformation and recrystallization kinetics in space-time domain during isothermal compressions for Ti-6Al-4V analyzed by multi-field and multi-scale coupling FEM[J]. Materials & Design,2016,94:523-535.
- [15] 王金刚,赵文凯,刘旭洋,等. 基于 Deform 的椭圆形封头热冲压成形有限元分析及优化[J]. 锻压技术,2020,45(12):40-46.
- [16] 杜红春,张祺. 钛合金切削加工参数优化数学模型及工艺参数分析研究[J]. 机电工程,2020,37(11):1280-1287.
- [17] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册:第 1 卷[M]. 北京:机械工业出版社,2007.