

锻造

## TC4 钛合金锻件疲劳寿命分析及其仿真模型修正

方秀荣<sup>1</sup>, 王自亮<sup>1</sup>, 杨锦辉<sup>2</sup>, 刘 岩<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中联重科股份有限公司, 湖南 长沙 410013)

**摘要:** 依据物理实验, 研究了锻造变形温度和变形程度两个关键参量对 TC4 钛合金锻件疲劳寿命的影响, 利用有限元与物理实验相结合的方法建立并修正了 TC4 钛合金锻件疲劳寿命仿真模型, 并对仿真模型进行了验证。结果表明: 相比于原材料, 锻造成形的 TC4 钛合金锻件具有较长的疲劳寿命, 并且变形温度控制在  $\alpha+\beta$  相变温度时所得锻件的疲劳寿命最长; 在最佳变形温度下, 变形程度控制在 50% 左右时锻件的疲劳寿命最长, 考虑锻造变形温度带的影响, 应尽可能提高锻锤频次; 锻件残余应力是影响仿真模型精度的主要因素, 通过验证表明, 引入实际锻件的最大等效残余应力可以极大地提高仿真精度, 这为深入分析锻造工艺参量对 TC4 钛合金锻件疲劳寿命的影响奠定了基础。

**关键词:** TC4 钛合金锻件; 疲劳寿命; 模型修正; 变形温度; 变形程度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.001

**中图分类号:** TG319      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0001-09

## Fatigue life analysis and simulation model modification on TC4 titanium alloy forgings

Fang Xiurong<sup>1</sup>, Wang Ziliang<sup>1</sup>, Yang Jinhui<sup>2</sup>, Liu Yan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Zoomlion Heavy Industry Science and Technology Co., Ltd., Changsha 410013, China)

**Abstract:** Influences of deformation temperature and deformation degree for forging on fatigue life of TC4 titanium alloy forgings were studied by physical experiments. Then, the simulation model of fatigue life for TC4 titanium alloy forgings was established and modified by combining finite element with physical experiment, and the simulation model was verified. The results show that compared with the raw materials, the forged TC4 titanium alloy forgings have longer fatigue life, and the forgings obtained by controlling the deformation temperature at  $\alpha+\beta$  phase deformation temperature have the longest fatigue life. At the optimum deformation temperature, when the deformation degree is controlled at about 50%, the fatigue life of forgings is the longest. Considering the influence of forging deformation temperature zone, the forging frequency should be increased as high as possible. Furthermore, the residual stress of forgings is the main factor affecting the accuracy of the simulation model, and the verification shows that the simulation accuracy can be greatly improved if the maximum equivalent residual stress of actual forgings is engaged, which lays the foundation for in-depth analysis on the influence of forging process parameters on the fatigue life of TC4 titanium alloy forgings.

**Key words:** TC4 titanium alloy forgings; fatigue life; model modification; deformation temperature; deformation degree

TC4 钛合金由于其优秀的综合性能而被作为大型装备中核心零部件的重要结构材料, 被广泛应用于航空航天、海洋船舶以及大型核电领域<sup>[1]</sup>。锻造成形能够使构件具有合适的应力、应变状态, 同时闭合构件原始铸锭内部的空洞和疏松型缺陷, 因此, 为了保证装备中核心构件的工作性能, 对于 TC4 钛

合金构件多采用锻造成形<sup>[2]</sup>。另外, 随着重大工业领域装备向大容量、高效率及长寿命的方向发展, 其核心构件在极端工作环境下的服役寿命与工作品质不断面临新的挑战, 相关科研人员对 TC4 钛合金核心构件展开了从强度设计层面跨越到寿命设计层面的研究<sup>[3-5]</sup>。

Dong X D 等<sup>[6]</sup>研究了不同加工方法对 TC21 钛合金表面完整性的影响, 并讨论了加工表面完整性对钛合金弯曲疲劳特性的影响。樊荣等<sup>[7]</sup>采用有限元方法建立了基于粗糙度及残余应力的钛合金材料疲劳寿命预测模型, 并通过实验验证了该模型在预

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51775427, 52175145)

作者简介: 方秀荣 (1971-), 女, 博士, 教授

E-mail: fangxr098@163.com

测辊磨光整加工后钛合金材料疲劳寿命的可行性。周晓虎等<sup>[8]</sup>研究了不同锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件微观组织和力学性能的影响规律,并获得了显微组织与综合性能的匹配规律。Wu G Q 等<sup>[9]</sup>研究了 Ti-6Al-4V 合金的组织类型和组织参数对高周疲劳性能的影响规律。Zhang M Q 等<sup>[10]</sup>采用非局部晶塑性有限元 (Crystal Plasticity Finite Element, CPFE) 模拟和极值统计相结合的方法,研究了组织对双相钛合金高周疲劳行为的影响;基于 Voronoi 方法生成了组织模型,研究了晶粒尺寸、晶粒取向、相体积分数和片层宽度等形貌和晶体特征对疲劳性能的影响。宋松<sup>[11]</sup>以连续损伤力学为基础,建立了高低周损伤本构模型,并利用有限元方法建立了 Ti-6Al-4V 钛合金材料高低周复合疲劳损伤寿命预测模型。虽然国内外学者从不同角度研究了影响钛合金服役寿命的因素,但从锻件性能入手进行疲劳寿命的分析却鲜有报道。钛合金的热导率低、应变速率敏感以及锻造变形温度范围窄,极大地增加了 TC4 钛合金的锻造加工难度,容易导致锻件的质量不稳定,进而威胁钛合金构件服役的安全性和可靠性。因此,建立锻造工艺参数与锻件疲劳寿命之间的复杂映射关联显得至关重要。

研究锻造工艺参数对锻件成形后疲劳寿命的影响规律,若仅依靠传统的物理锻造实验和疲劳拉伸实验来得到不同锻造变形温度对锻件试样疲劳寿命的影响规律,会耗费大量资源;但若单纯依靠模拟软件进行仿真分析,虽然能够减少资源的浪费且效率高,但仿真结果的精度受软件内置参数设置的影响很大,难以在工业领域得到认可。因此,本文通过对不同锻造工艺参数下 TC4 钛合金锻件进行物理实验,以实验结果为依据,采用物理实验与有限元相结合的手段,建立 TC4 钛合金锻件的疲劳寿命仿真模型,通过调整疲劳仿真控制参数,修正疲劳寿命仿真模型,从而使其具有可靠的仿真精度,并对其进行验证,可为 TC4 钛合金锻件的疲劳寿命预测模型的建立提供可靠的理论支撑。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

TC4 钛合金是难锻造材料,锻造变形的温度范围窄、热导率低、对应变速率敏感等因素均会影响锻件的质量。实验所用材料为 TC4 钛合金,其坯料的实物图如图 1 所示,坯料尺寸为  $\Phi 165 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

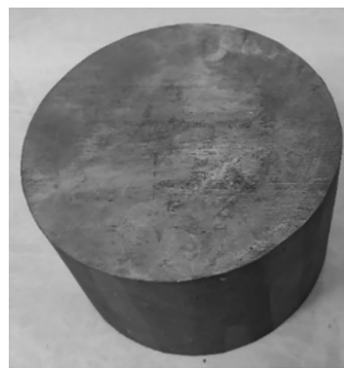


图 1 TC4 钛合金坯料实物图

Fig. 1 Physical diagram of TC4 titanium alloy blank

### 1.2 实验设计

已有的研究表明,锻造变形温度、变形程度及变形速率等工艺参数对钛合金锻件的组织和力学性能具有显著影响,其中变形温度和变形程度对钛合金锻件组织和力学性能的影响是相互作用的<sup>[12-13]</sup>。TC4 钛合金是典型的 ( $\alpha + \beta$ ) 两相钛合金,在锻造过程中相变的发生与变形温度有直接的关系,而相变的发生会导致锻件的微观组织和力学性能不同,进而影响锻件质量的稳定性。对于不同的锻造变形程度来说,锻件的变形抗力也会不同,同时对晶粒的细化程度与组织体积分数也有直接影响。若锻造的变形程度过小,则不足以打碎原有的铸态组织;而变形程度过大,则变形不均匀性增加,导致锻件局部  $\alpha$  晶粒增大,影响锻件的微观组织和力学性能<sup>[14]</sup>。因此,本文主要分析锻造变形温度和变形程度对 TC4 钛合金锻件疲劳寿命的影响规律。

根据 TC4 钛合金的  $\beta$  相的转变温度  $T_\beta$  ( $985^\circ\text{C}$ )<sup>[15]</sup>,设置 5 个不同的锻造变形温度,分别为  $\alpha + \beta$  锻造 ( $T_\beta - 60^\circ\text{C}$  和  $T_\beta - 35^\circ\text{C}$ )、近  $\beta$  锻造 ( $T_\beta - 10^\circ\text{C}$ )、准  $\beta$  锻造 ( $T_\beta + 15^\circ\text{C}$ ) 和  $\beta$  锻造 ( $T_\beta + 40^\circ\text{C}$ ),如表 1 所示。

表 1 不同变形温度下的锻造实验方案

Table 1 Forging experiment schemes under different deformation temperatures

锻件编号	变形区	温度/ $^\circ\text{C}$
1 <sup>#</sup>	$\alpha + \beta$	925
2 <sup>#</sup>	$\alpha + \beta$	950
3 <sup>#</sup>	近 $\beta$	975
4 <sup>#</sup>	准 $\beta$	1000
5 <sup>#</sup>	$\beta$	1025

将 TC4 钛合金允许的变形范围设为 30%~70%，即在这个范围内设置 5 个不同的锻造变形程度，分别为 30%、40%、50%、60% 和 70%。

为确保锻造变形温度、变形程度对锻件疲劳寿命的影响，可进行准确的单因素分析，在保持其他条件相同的情况下，先进行不同锻造变形温度的锻造实验，之后对锻件取样，测试其力学性能与疲劳拉伸循环寿命。为了避免数据的偶然性，每组实验进行 3 次，并对实验结果求取平均值。以疲劳寿命为评价指标，确定最佳寿命的锻造变形温度，再在最佳变形温度下进行不同锻造变形程度的重复实验。

### 1.3 实验设备及方法

锻造加工是金属塑性加工的一种简单而灵活的基本成形方法，实验选用自由锻电液锤来锻造 TC4 钛合金坯料，即 CZYQ-120 型 3 t 自由锻电液锤，如图 2 所示。为减小锻造过程中砧板与锻件之间的导热效应，在锻造开始前，将上、下砧板调至合适距离，在上、下砧板之间放置若干个棒状材料，利用喷枪对其进行加热。



图 2 锻造设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forging equipment

利用 RT3-120-12 高温箱式电阻炉，将 TC4 钛合金坯料加热至指定温度并保温一定时长，以确保坯料内外温度一致。因 TC4 钛合金的变形温度带窄，实验时将坯料从炉内取出并放置到砧板，即刻开始锻造，中间时差严格控制在 5 s 以内，至锻造结束总时间不超过 20 s。锻造结束后，锻件空冷至室温，此时锻件实物如图 3 所示。

将不同锻造工艺参数下获得的 TC4 钛合金锻件，通过线切割取得棒状拉伸试样与疲劳试样，并加工成标准圆柱拉伸试样（图 4）及疲劳拉伸试样（图 5）。

用 Instron 5986 型电子万能材料试验机测试各试样的力学性能，为获取应变数据以方便绘制应力-



图 3 锻件实物图

Fig. 3 Physical diagram of forgings

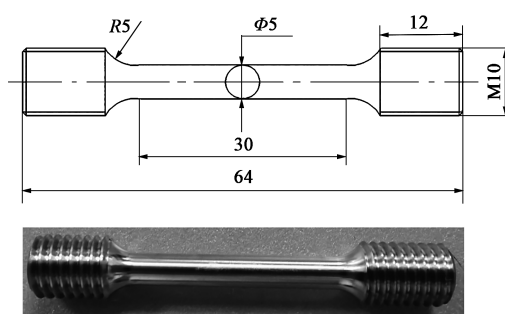


图 4 常温拉伸试样示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tensile sample at room temperature

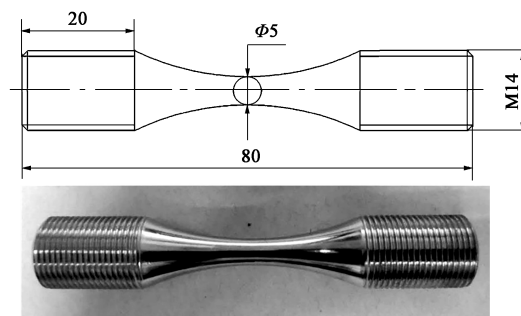


图 5 疲劳拉伸试样示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fatigue tensile sample

应变图，可在实验前在试样上加装引伸计，以精确测量试样实验段的变形情况。

锻件的疲劳性能以 TC4 钛合金制成的汽轮机叶片加载工况为研究背景，考虑叶片所加载荷主要以离心力为主，其疲劳载荷主要为拉伸疲劳，因此，制定的疲劳拉伸实验亦为拉伸形式的高周疲劳实验。利用 Zwick Amsler HFP5100 高频实验机，设置主要参数即可测得试样在该载荷下的疲劳循环周次。取最大应力约为  $0.7 R_m$ （其中  $R_m$  为抗拉强度），应力比为 0.1，实验频率约为 70 Hz，执行标准为 GB/T 3075—2021<sup>[16]</sup>。



## 2 TC4 钛合金锻件疲劳寿命分析

### 2.1 锻造变形温度对锻件疲劳寿命的影响

将不同锻造变形温度下所得锻件试样的常温拉伸实验数据绘制成如图 6 所示的应力-应变图, 并通过拟合弹性变形阶段直线的斜率, 确定不同锻造变形温度下锻件的弹性模量。所得实验结果可为疲劳寿命有限元模型的建立提供依据。

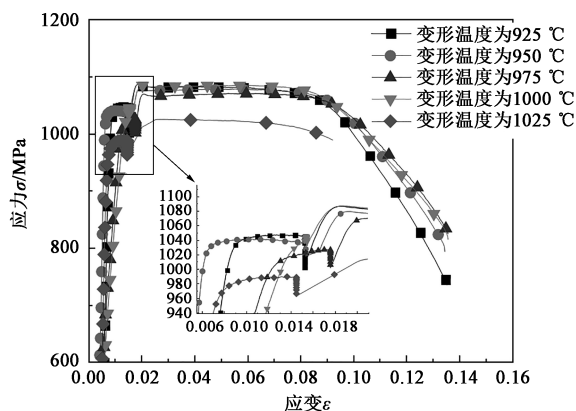


图 6 不同变形温度下锻件试样的应力-应变图

Fig. 6 Stress-strain diagram of forging samples under different deformation temperatures

通过常温拉伸实验获得不同变形温度下锻件试样的相关力学性能, 如表 2 所示。

表 2 不同锻造变形温度下锻件试样的力学性能

Table 2 Mechanical properties for forging samples under different deformation temperatures

力学性能	锻件编号					
	原材料	1#	2#	3#	4#	5#
抗拉强度 $R_m$ /MPa	1025	1086	1079	1070	1086	1033
屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	957	1026	1020	1008	1014	926
弹性模量 $E$ /GPa	106.2	132.6	121.0	132.2	128.2	113.4

不同锻造变形温度下锻件试样的疲劳寿命如图 7 所示, 其中包括原材料的疲劳寿命。从图 7 中可以看出, 除了锻件 5# (变形温度为 1025 °C) 外, 锻造后试样的疲劳寿命均高于原材料的疲劳寿命, 且随着锻造变形温度的升高而下降。从图 7 中看出, 锻件 1# (变形温度为 925 °C) 的疲劳寿命最长, 因为 TC4 钛合金本身即为典型的  $\alpha+\beta$  型钛合金, 故在  $\alpha+\beta$  两相区锻造可以很好地细化显微组织, 使得钛合金锻件的塑性和疲劳性能有所提高。锻件 4# (变形温度为 1000 °C) 的疲劳寿命出现了少量的增加,

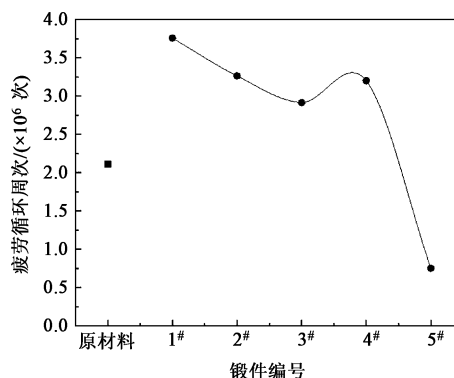


图 7 不同变形温度下锻件试样的疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life for forging samples under different deformation temperatures

这是因为: 在该温度下, 钛合金组织中的相已有一部分发生转变, 使得 3 种晶粒组织同时存在, 且兼顾各组织的性能特点, 因此, 疲劳寿命会相对提升。锻件 5# (变形温度为 1025 °C) 的疲劳寿命远低于其他锻造变形温度下锻件的疲劳寿命, 因锻造变形温度在 1025 °C 时会使得锻件产生粗大的  $\beta$  晶粒, 使得锻件的塑性急剧下降, 脆性的提高会导致疲劳寿命降低, 说明锻造变形温度过高会使锻件的疲劳寿命降低, 故在实际生产过程中以 TC4 钛合金的疲劳寿命为构件设计要求时, 应避免在 1025 °C 下锻造。

### 2.2 锻造变形程度对锻件疲劳寿命的影响

由前面的分析可以确定, 锻件最佳疲劳寿命的变形温度为 925 °C, 因此, 在此变形温度基础上进行不同变形程度的 TC4 钛合金锻造实验。为保证实验的准确性, 保持其他条件一致。将不同锻造变形程度下所得锻件试样的常温拉伸实验数据绘制成如图 8 所示的应力-应变图, 相关力学性能参数如表 3 所示。所得实验结果可为锻件疲劳寿命仿真模型的验证提供有效的依据。

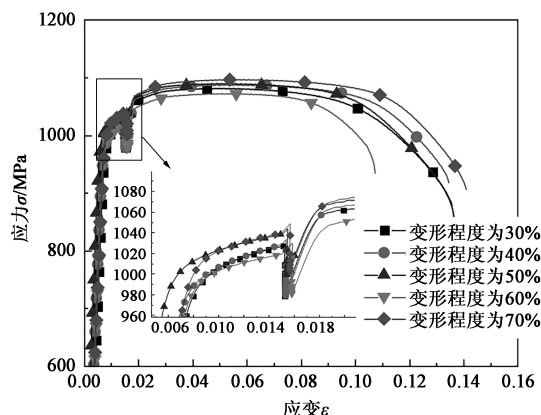


图 8 不同变形程度下锻件试样的应力-应变图

Fig. 8 Stress-strain diagram of forging samples under different deformation degrees

表 3 不同变形程度下锻件试样的力学性能  
Table 3 Mechanical properties for forgings under different deformation degrees

力学性能	变形程度/%				
	30	40	50	60	70
抗拉强度 $R_m$ /MPa	1076	1082	1084	1067	1091
弹性模量 $E$ /GPa	128.0	132.2	131.5	124.8	122.7

不同锻造变形程度下 TC4 钛合金锻件试样的疲劳寿命如图 9 所示。从图 9 中可以看出，在同一锻造变形温度下，不同变形程度锻件试样的疲劳寿命也不相同，随着变形程度的增加，锻件疲劳寿命呈波动式变化且波动幅值也是变化的。锤锻的塑性变形通过有限的锻造次数使锻件发生变形直至达到变形程度的要求，变形程度的增加会使 TC4 钛合金锻件内部热应力的不均匀性增强，同时晶粒细化且急剧增加，导致锻件的疲劳寿命不稳定。总体说来，变形程度为 50% 时锻件疲劳寿命最佳。变形程度大于 50% 时，锻件的疲劳寿命下降；变形程度小于 50% 时，锻件的疲劳寿命上升。因此，在考虑锻锤锻造中锻件的变形程度时，在保证细化组织的前提下，应尽量提升锻造频次，控制总变形程度为 50% 左右，对提高锻件疲劳寿命是有利的。

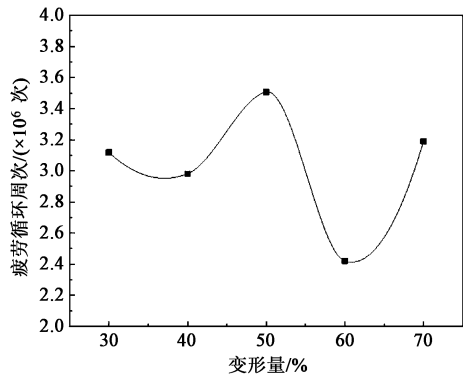


图 9 不同变形程度下锻件试样的疲劳寿命  
Fig. 9 Fatigue life for forging samples under different deformation degrees

### 3 TC4 钛合金锻件疲劳寿命仿真模型的建立与修正

物理实验的目的是为了得到 TC4 钛合金锻件实际的疲劳寿命，但仅靠物理实验来获得锻件疲劳寿命会消耗大量的资源和经费。因此，以少量的物理实验检测结果为依据，利用数值模拟方法，建立与

实际锻件相符的疲劳仿真模型，研究不同锻造工艺参数对锻件疲劳寿命的影响规律，可以大大提高效率并节约成本。因此，利用物理实验数据对仿真模型进行修正和验证，以保证仿真模型的精度，确保研究结果的准确性显得尤为重要。

#### 3.1 仿真模型的建立

采用 ABAQUS+Fe-Safe 有限元软件对不同锻造变形温度下锻件试样的疲劳寿命进行模拟。材料参数参照表 2 和表 3。根据实际疲劳实验进行仿真模型的加载，加载示意图如图 10a 所示，施加 89.28 MPa 的面载荷，采用六面体结构网格；为提高仿真精度，对主要分析部位中间实验段进行网格细化，如图 10b 所示。将 ABAQUS 所得的计算结果文件导入 Fe-safe 软件时，材料和载荷参数设置保持一致，应力比为 0.1，表面粗糙度  $Ra \leq 0.25 \mu\text{m}$ 。

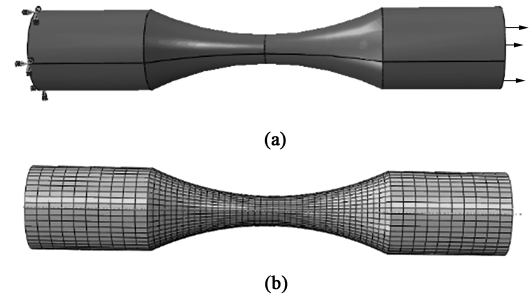


图 10 试样加载 (a) 和网格划分 (b) 示意图  
Fig. 10 Schematic diagrams of sample loading (a) and meshing (b)

#### 3.2 仿真模型的分析及修正

数值仿真得到不同锻造变形温度下锻件的疲劳寿命云图，如图 11 所示，其疲劳循环周次以对数形式呈现。从图 11 中可以直观地看到各试样疲劳寿命的分布情况，中间实验段的疲劳寿命最低。

将不同锻造变形温度下锻件试样的疲劳寿命仿真结果与物理实验结果作对比，如图 12 所示。从图 12 中可以看出，两条曲线具有相同的变化趋势，这说明仿真结果能够正确反应锻件试样的疲劳寿命随锻造变形温度的变化规律。但从纵向看，仿真结果与实验结果存在较大误差，误差值基本一致。

已有研究表明，锻造成形的 TC4 钛合金由于在升温、降温和塑性变形等过程中会引入残余应力，即使通过后续热处理方法消除，但锻件残余应力仍然有部分保留在产品中<sup>[17]</sup>。在仿真控制参数设置中并没有考虑锻件残余应力的影响，这会影响仿真结果的准确性。锻造变形温度为 925 ℃ 时锻件的等效残余应力在试样不同深度方向的分布如图 13 所示<sup>[18]</sup>，利用这些数据结合仿真结果与实验结果的差

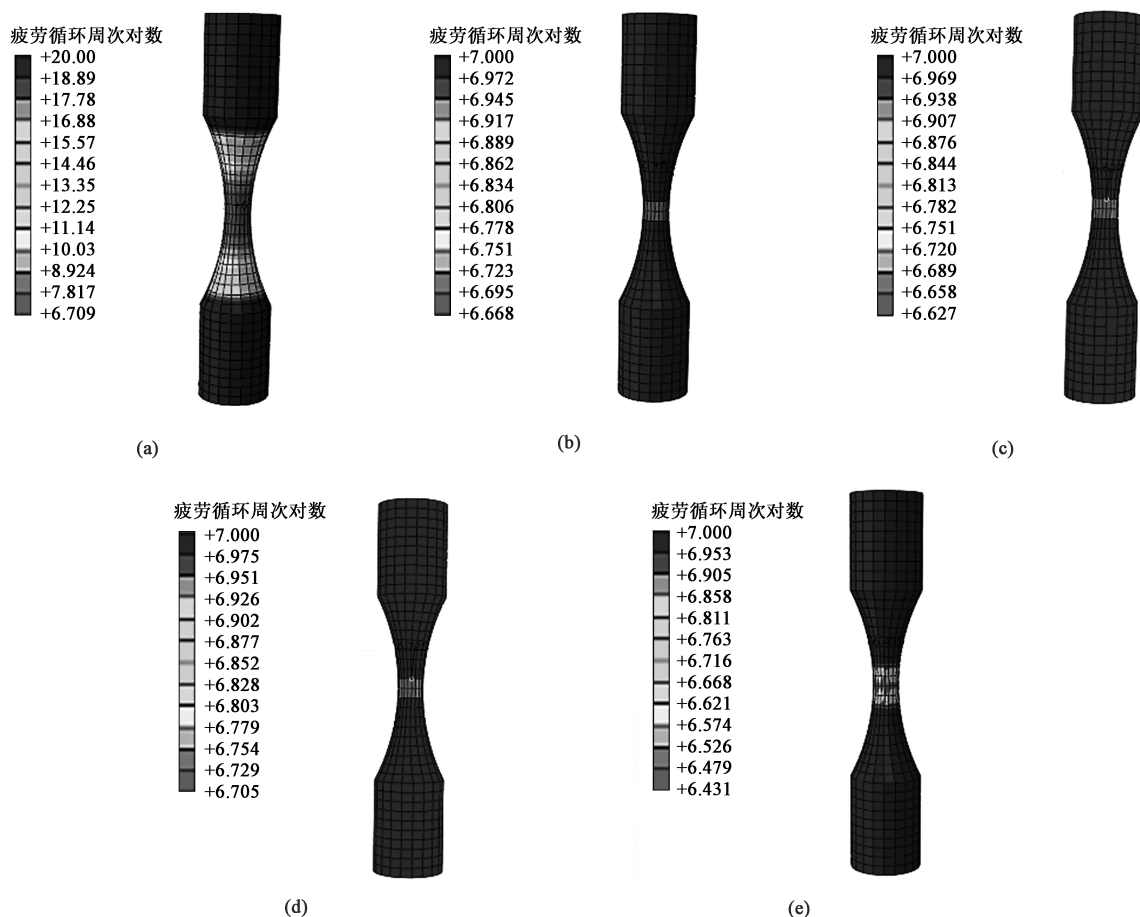


图 11 不同变形温度下锻件的疲劳寿命仿真结果云图

(a) 925 °C (b) 950 °C (c) 975 °C (d) 1000 °C (e) 1025 °C

Fig. 11 Cloud diagrams of simulation results for fatigue life of forgings under different deformation temperatures

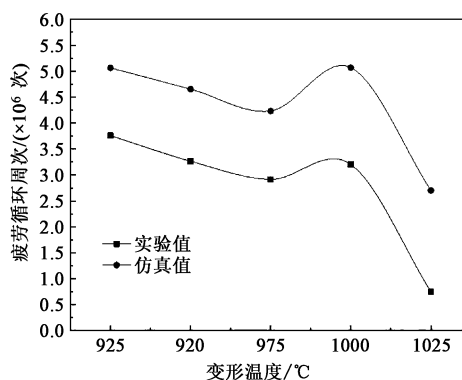


图 12 不同变形温度下锻件疲劳寿命的仿真结果与实验结果对比

Fig. 12 Comparison between simulation and experiment results of fatigue life for forgings under different deformation temperatures

异性进行仿真模型修正, 确定在锻件疲劳寿命仿真模型中引入残余应力值为 50 MPa。

### 3.3 修正后仿真模型的验证

采用修正后的控制参数重复之前的仿真过程, 得到修正后不同锻造变形温度下锻件的疲劳寿命云

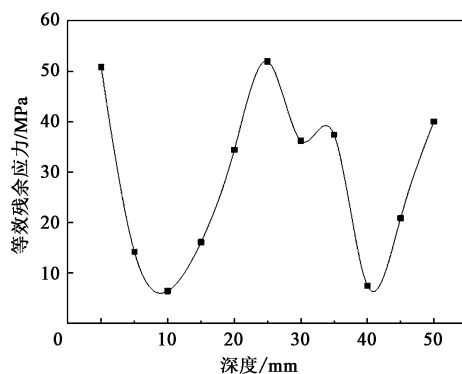


图 13 锻造变形温度为 925 °C 时锻件的等效残余应力分布

Fig. 13 Equivalent residual stress distribution of forgings at forging deformation temperature of 925 °C

图, 如图 14 所示, 可以看出与修正前各试样疲劳寿命的分布情况基本一致, 均为中间实验段的疲劳寿命最低, 并向两侧依次递增。

修正后的仿真结果与实验结果对比如图 15 所示, 修正后锻件疲劳寿命的仿真结果与实验结果非常接近, 说明修正后锻件的仿真模型的精度较高,

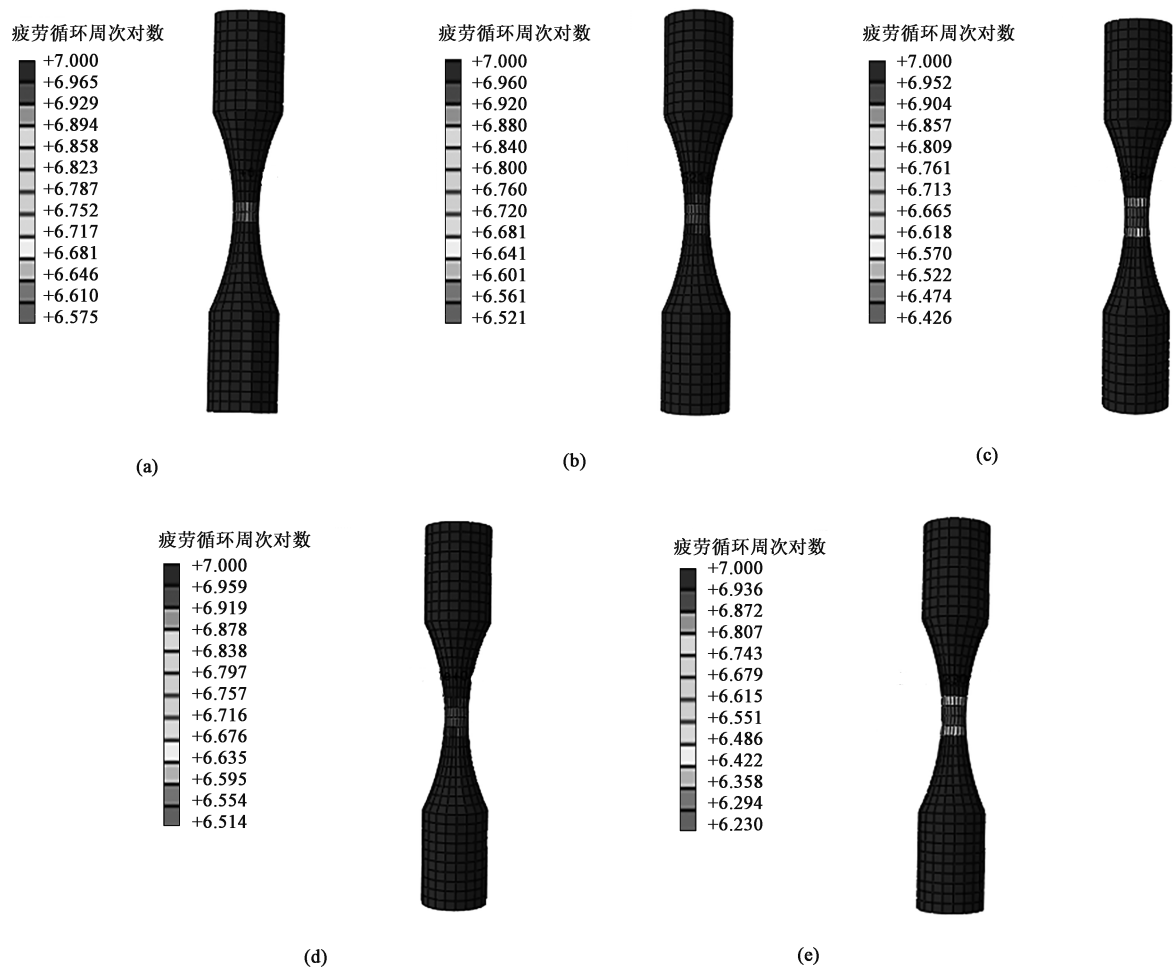


图 14 修正后不同变形温度下锻件的疲劳寿命仿真结果云图  
(a) 925 °C (b) 950 °C (c) 975 °C (d) 1000 °C (e) 1025 °C

Fig. 14 Cloud diagrams of simulation results for fatigue life of forgings under different deformation temperatures after correction

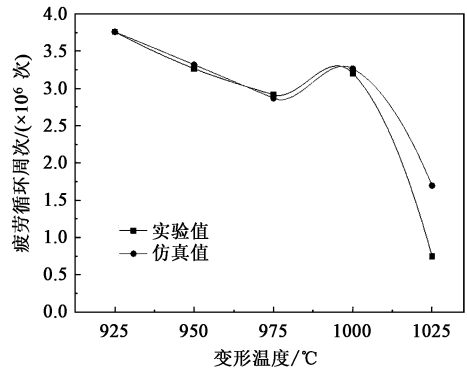


图 15 修正后不同变形温度下锻件疲劳寿命的仿真结果与实验结果对比

Fig. 15 Comparison between simulation and experiment results of fatigue life for forgings under different deformation temperatures after correction

能够较为准确地反映锻件试样疲劳寿命的实际情况。  
为了进一步验证仿真模型的准确性，利用修正后的仿真模型对不同变形程度的锻件试样的疲劳寿

命进行分析，并与实验结果进行对比，如图 16 所示。仿真结果与实验结果能够较好地吻合，说明修正后的仿真模型具有较高的可靠性，能够有效地进行锻件试样的疲劳寿命分析，为 TC4 钛合金在不同锻造工艺参量下疲劳寿命的分析提供了理论依据。

#### 4 结论

(1) 相比于原材料，锻造成形的 TC4 钛合金构件有较长的疲劳寿命。同时，不同的锻造变形温度下锻造成形的 TC4 钛合金锻件的疲劳寿命也不同：在  $\alpha+\beta$  相区，锻造变形温度为 925 °C 时锻件的疲劳寿命最优；而在  $\beta$  相区，锻造变形温度为 1025 °C 时锻件的疲劳寿命最差。

(2) 当在相同的锻造变形温度下选取不同的变形程度进行 TC4 钛合金塑性成形时，锻件疲劳寿命的变化虽然不大，但总体显示锻造变形程度为 50%



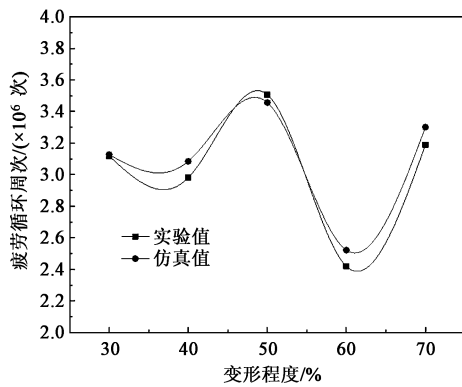


图 16 不同变形程度下锻件试样疲劳寿命的仿真结果与实验结果对比

Fig. 16 Comparison between simulation and experiment results of fatigue life for forging samples under different deformation degrees

时锻件的疲劳寿命最长, 所以, 在锻造成形中应尽量控制锻件的总变形程度在 50% 左右, 考虑材料的变形温度带窄的影响, 应当适当提高锻锤频次, 有利于提高 TC4 钛合金锻件的疲劳寿命。

(3) 通过锻件材料的疲劳寿命物理实验和仿真模型结果的对比, 明确残余应力是影响 TC4 钛合金锻件疲劳寿命仿真模型精度的主要因素, 锻件的疲劳寿命的仿真模型应当引入锻件最大残余应力, 以提高锻件疲劳寿命仿真模型的准确性, 在此模型的基础上可以进一步分析不同锻造工艺参量对 TC4 钛合金疲劳寿命的影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展 [J]. 航空材料学报, 2020, 40 (3): 77-94.  
Liu S F, Song X, Xue T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40 (3): 77-94.
- [2] 杨晶, 任晓龙, 王涛, 等. 海洋工程用超大规格 Ti80 钛合金锻坯制备研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 19-22.  
Yang J, Ren X L, Wang T, et al. Research on preparation of oversized forging billet for Ti80 titanium alloy in ocean engineering [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 19-22.
- [3] 李鸿江, 于洋, 宋晓云, 等. 新型 Ti-6554 钛合金热变形行为及热加工图 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (5): 462-468.  
Li H J, Yu Y, Song X Y, et al. Thermal deformation behavior and processing map of a new type of Ti-6554 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (5): 462-468.
- [4] 程巨强, 史超. 钛合金的组织、性能及加工技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (2): 5-8, 13.  
Cheng J Q, Shi C. Study progress of microstructure, properties and processing technology of titanium alloys [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (2): 5-8, 13.
- [5] 蒋泽, 许希武, 郭树祥, 等. 基于材料细观特性的 TC4 钛合金疲劳裂纹萌生寿命仿真 [J]. 机械强度, 2021, 43 (2): 425-433.  
Jiang Z, Xu X W, Guo S X, et al. Simulation of fatigue crack initiation life of TC4 titanium alloy based on its mesoscopic properties [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43 (2): 425-433.
- [6] Dong X D, Liu D X, Sun Y F, et al. The effects of machined workpiece surface integrity on the fatigue life of TC21 titanium alloy [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1766: 382-389.
- [7] 樊荣, 李秀红, 李文辉, 等. 基于 ABAQUS/FE-SAFE 的 TC4 钛合金板材疲劳寿命仿真与实验 [J]. 表面技术, 2017, 46 (1): 158-163.  
Fan R, Li X H, Li W H, et al. Fatigue life simulation and experiment of TC4 titanium alloy board based on ABAQUS/FE-SAFE [J]. Surface Technology, 2017, 46 (1): 158-163.
- [8] 周晓虎, 刘卫, 郝芳, 等. 准  $\beta$  锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件组织及性能的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (6): 29-35.  
Zhou X H, Liu W, Hao F, et al. Influence of quasi- $\beta$  forging process on microstructure and properties of TC21 titanium alloy large forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (6): 29-35.
- [9] Wu G Q, Shi C L, Sha W, et al. Effect of microstructure on the fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloys [J]. Materials and Design, 2012, 46 (2): 668-674.
- [10] Zhang M Q, Han F B, Tang B, et al. Effects of microstructure on high cycle fatigue properties of dual-phase Ti alloy: Combined non-local CPFE simulations and extreme value statistics [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 5991-6000.
- [11] 宋松. 基于连续损伤力学的 Ti-6Al-4V 钛合金高低周复合疲劳损伤研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.  
Song S. The Research of Combined High and Low Cycle Fatigue Damage of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Based on the Continuum Damage Mechanics [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] 周渝庆, 张祥. 机械紧固件用新型钛合金的锻造温度优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 35-40.  
Zhou Y Q, Zhang X. Optimization on forging temperature of new titanium alloy for mechanical fasteners [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 35-40.
- [13] 孙世仁, 刘虹, 陈文琳, 等. 基于有限元软件的锻造工艺参数对牵引拉杆成形的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (15): 68-72.  
Sun S R, Liu H, Chen W L, et al. Influence of forging process parameters on forming of traction rod based on finite element software [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (15): 68-72.
- [14] Yu W X, Li M Q, Luo J. Effect of processing parameters on microstructure and mechanical properties in high temperature deformation of Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38 (1): 19-24.
- [15] 刘伟东, 屈华. TC4 合金 ( $\alpha+\beta$ )/ $\beta$  转变温度的金相法测定与理论计算 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (11): 1210-1213.