文章编号: 1004-0609(2013)12-3323-12

TC18 钛合金盘件等温模锻过程有限元模拟及试验

李 礼,张晓泳,李 超,李志友,周科朝

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要:通过热模拟试验建立 TC18 合金的 Arrhenius 型本构关系,采用有限元模拟方法系统研究变形温度、变形 速率和摩擦因数等因素对 TC18 缩比盘件等温模锻过程的影响,从而得到该合金较合理的模锻工艺条件,并用于 指导具体试验。结果表明:变形温度 840 ℃、变形速率 0.1 mm/s、摩擦因数 0.03 为该合金较合理的等温模锻变形 条件;在有限元模拟工艺的指导下成功锻造出该合金盘件,并验证有限元模拟结果的正确性;同时,为其他钛合 金复杂件的等温模锻工艺提供数值依据与技术指导。

关键词: TC18 钛合金; 盘件; 等温模锻; 有限元模拟 中图分类号: TG113; TG146 文献标志码: A

Finite element simulation and experiment of isothermal die forging process of TC18 Ti alloy disc

LI Li, ZHANG Xiao-yong, LI Chao, LI Zhi-you, ZHOU Ke-chao

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Arrhenius constitutive relationship of TC18 Ti alloy obtained from thermal simulation test was used to simulate the isothermal die forging of reduced-scale TC18 disc by finite element method. The suitable deformation conditions were obtained and applied to guide the experiment through systemically investigating the influence of deformation temperature, rate and friction factor on the isothermal die forging process. The result show that the suitable isothermal die forging conditions are that the temperature is 840 °C, rate is 0.1 mm/s and friction factor is 0.03. The TC18 Ti disc is successfully fabricated under the guidance of finite element simulation, while the accuracy of simulation is also verified by the forging experiment. The related investigation can provide the numerical and technological support for other complex components.

Key words: TC18 Ti alloy; disc; isothermal die forging; finite element method

盘类及盘轴类回转对称构件作为机械传动和承载 的关键部件,在航空航天、能源、交通等诸多领域具 有广泛的应用。近年来,随着我国国民经济和科学技 术的发展,高性能盘件的需求量迅速增加,对其质量 及性能上的要求也越来越严格^[1]。高性能钛合金的开 发与应用,能够有效减轻盘件自身质量,提高盘件性 能,符合高性能盘件的发展趋势,是目前制造盘类零 件的重要材料之一^[2]。TC18其名义成分为Ti-5Al-5Mo**5V-1Cr-1Fe**, 是一种近 β 高强韧钛合金, 在 300~350 ℃时,仍然具有较高的热强性,能够满足航空发动机一级盘的应用要求^[3-4]。如赵红霞^[5]、罗雷等^[6]、韩栋等^[7]均指出该合金可用于制造温度不超过 350 ℃的发动机风扇盘和叶片等零件。

等温锻造是制作包括盘类构件在内的钛合金重要 锻造工艺和发展方向之一^[8]。在等温锻造过程中,通 过严格控制坯料/模具温度、应变速率等参数,能够改

收稿日期: 2012-09-14; 修订日期: 2013-07-20

基金项目:国家自然科技基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(51021063);湖南省科技重大专项基金资助项目(2010F51004);中南大学前 沿研究计划资助项目(2009QZZD007)

通信作者: 张晓泳,助理研究员,博士; 电话: 0731-88836264; E-mail: zhangxiaoyong@csu.edu.cn

善或消除模具激冷带来的材料应变硬化,从而显著降 低合金变形抗力,提高坯料成形性能,达到省力成形 的目的^[9]。然而,目前国内外对于盘类构件锻造工艺 的设计主要依赖于高成本、长周期的传统"试错"手 段,严重制约其发展。有限元模拟技术的出现,为快 速调整与优化锻造工艺提供了一种有效途径,国内外 学者应用此方法进行了大量的理论研究与相关验证试 验。SRINIVASAN 等^[10]采用有限元与 CAD-CAM 技 术相结合的方法对航空航天用盘件制造过程进行了研 究,发现使用这种集成技术能够有效降低生产成本和 周期。朱磊等^[11]通过热模拟试验建立 TC11 钛合金的 Kumar 型本构方程,采用 MARC/Autoforge3.1 有限元 软件对 TC11 合金某型号涡轮盘的等温锻造工艺进行 模拟设计,结果表明这种与实际材料本构关系相结合 的有限元模拟方法具有很高的工程实用性。陈希凯 等^[12]通过建立 TC4 合金的回归模型, 对该合金盘件的 等温锻造工艺过程进行了有限元模拟,有效提高实际 锻造工艺参数的优化效率。YU 等^[13]采用 DEFORM-3D,对TC11合金整体叶盘在恒定的温度、 不同应变速率下的热锻过程进行了有限元模拟,获得 了 TC11 整体叶盘成型过程中的温度场、等效应变场 以及行程--载荷曲线,以此确定了合理的实际工艺方 案,结果表明随着应变速率的降低,金属流动更加均 匀、填充性更好。

目前,针对钛合金盘类构件的应用,国内外学者 多采用以TC4^[12]、TC11^[13]、TC6^[14]等为主的近α或α+β 钛合金作为研究对象,而涉及TC18合金盘类构件的 应用研究较少。此外,文献[13-16]报道的锻造过程模 拟研究大多局限于单一影响因素下的热模锻,对多因 素下等温模锻的研究甚少。为此,本文作者采用 Deform-3D有限元软件对TC18合金盘件的等温模锻 过程进行仿真分析,其中首先利用热模拟试验建立 TC18变形本构方程;然后采用有限元方法,系统研究 变形温度、变形速率、摩擦因数等因素对模锻过程中 温度场、等效应力/应变场及锻机压力的影响,从而得 出较合理的等温变形条件;最后基于仿真结果,进行 TC18 缩比盘件的等温模锻试验。

1 实验与仿真过程

1.1 初始仿真模型

TC18 合金初始坯料与最终期望锻件外形如图 1 所示。初始坯料尺寸为 d 36 mm×20 mm,在有限元 模拟前处理过程中共划分成 27886 个四面体单元。从 锻造角度考虑,为了保证对中性,在坯料上下端面分 别设计与模腔匹配的定位卡槽。最终锻件外形参考了 文献[10]和[11]报道的盘件表面凹凸台结构设计以及 文献[14]报道的盘件边缘凸台结构设计,同时在尺寸 上进行同比缩放,其最大直径为 d 60 mm。合金初始 坯料和模具均由 SolidWorks 建模,然后导入 DEFORM-3D 进行有限元模拟。模锻过程示意图如图 2 所示。

1.2 材料特性参数

TC18 合金坯料由湖南省湘投金天钛业科技有限 公司提供(β 相变点温度为(870±5)℃),并选用由株洲 硬质合金集团有限公司生产的纯 Mo 棒作为模具材 料。相关材料参数如表 1 所列^[17-19]。

1.3 材料本构方程

本构方程主要用于预测合金在塑性变形过程中应 变速率、应变、应力与温度之间的关系。为了保证有 限元模拟的准确性,本研究中,首先通过热模拟试验, 获得所用 TC18 合金在压缩温度 800~950 ℃、应变速 率 0.01~10 s⁻¹ 下的真应力一应变曲线,然后采用 Sellars 和 Tagart 提出的双曲正弦形式本构模型^[20-21], 构建如下 TC18 合金的变形本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 2.54418 \times 10^{14} [\sinh(9.576\,991 \times 10^{-3}\,\sigma)]^{3.93} \cdot \exp[-341.268 \times 10^{3}\,/(RT)]$$
(1)

另外,采用杨松涛等^[22]在研究纯 Mo 板坯高温塑



「「「」 が知道中午一〇〇九道山下市が快生 Fig. 1 Model of initial stock(a) and final disc(b)



图 2 TC18 盘件模锻压缩过程示意图

Fig. 2 Sketch for pressing reduction during die forging process of TC18 disc: (a) 0 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 16 mm

表1 模拟中采用的材料参数

 Table 1
 Material parameters used during finite element simulation

Material	Temperature/	Density/ (g·cm ⁻³)	Elasticity modulus/ MPa	Poisson's ratio	Specific heat/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal expansion/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Emissivity
TC18	800	4.62	7 450	0.33	863	8.0	18.7	0.6
	820	4.62	7 450	0.33	872	8.4	18.7	0.6
	840	4.62	7 450	0.33	887	8.8	19.2	0.6
	860	4.62	7 450	0.33	896	9.3	19.8	0.6
Мо	800	9.90	297 000	0.324	272.35	4.3	113	0.7
	820	9.90	297 000	0.324	272.35	4.7	122	0.7
	840	9.90	297 000	0.324	272.35	5.8	131	0.7
	860	9.90	297 000	0.324	272.35	6.2	137	0.7

$$\dot{\varepsilon} = 6.19182 \times 10^8 [\sinh(3.8 \times 10^{-3} \sigma)]^{-7.7175} \cdot \exp[-282.479 \times 10^3 / (RT)]$$
(2)

1.4 模拟过程

本研究针对模锻过程设定的模拟参数和边界条件 分别如表 2 和图 2 所示,其中坯料/模具之间的传热系 数为 11 N/(s·mm·℃),坯料/模具与外部环境的传热系 数为 0.02 N/(s·mm·℃),并且在坯料/模具上施数值为 50 N/(s·mm)的热源,使整个模锻过程中坯料/模具温度 与仿真初始设定温度保持恒定。在模锻仿真过程中采 用 Newton-Raphson 迭代方式和 Von Mises 材料屈服准则。另外,为了提高仿真精度和效率,采用如下基本 假设:

1) 所选材料均匀, 各向同性;

2) 鉴于模锻件具有高度对称性,采用 1/4 建模,

视4个部分所受载荷相同,为整体的1/4;

3) 忽略模具的弹性变形,将其视为不变形刚体;

4) 坯料/模具在模锻过程中的散热与加热处于动态平衡,即处于严格的等温状态;

5) 摩擦因数在模锻过程中视为不随变形温度、变 形速率而改变的定值。

2 结果与分析

2.1 变形温度的影响

图 3 所示为变形速率 0.1 mm/s、摩擦因数 0.03、 不同变形温度下坯料的温度场分布图。由图 3 可以发现,由于合金在模锻过程中大部分变形能转化为变形 热,导致坯料在不同温度下变形时均出现了不同程度 的温升现象。随着变形温度的升高,合金变形流动性 能得以改善,即更易于成型,变形不均匀性得到抑制, 锻件的温度场均匀性也随之提高:锻件内最大温升和 温差分别由 800 ℃时的 7.3 ℃和 2.3 ℃降至 860 ℃时的 4.3 ℃和 1.3 ℃。然而,当变形温度升至 860 ℃时(见 图 3(d)),由温升造成的坯料实际温度 864.3 ℃已经十 分接近 β 相变点。上述结果表明,虽然提高温度能够 有效抑制变形不均匀性,但对温度控制精确性要求也

表2 等温模锻模拟条件

Table 2 Simulation conditions of isothermal die forging

随之增加,否则容易导致坯料温度超过β相变点、进 而造成因β晶粒异常长大引起的力学性能恶化,因此 在实际设定模锻温度时需要充分考虑温升效应带来的 影响。

图 4 和 5 所示为变形速率 0.1 mm/s、摩擦因数 0.03、不同变形温度下坯料的等效应力和应变场分布 图。由图 4 可以看出,在模锻过程中,随着变形温度 的升高,合金的软化程度增强,流动性得以改善,变 形抗力降低,进而引起锻件等效应力逐渐下降,由 800 ℃的 196 MPa 下降至 860 ℃的 145 MPa。与此同时,如图 5 所示,随着变形温度的升高,最大等效应变与最小等效应变之间的差值变小,由 800 ℃的 3.803 降低到 840 ℃的 3.70,表明中等变形区域增大,大变形和难变形区域缩小,锻件变形更为均匀。在模锻终了 阶段,锻件圆角以及台阶等难以填充区域,容易存在合金流动剧烈的现象,因此,锻件的最大等效应力与最大等效应变均集中在该区域。值得注意的是,当变

	ē	6	
Process	Temperature/°C	Test impact factor rate/(mm \cdot s ⁻¹)	Friction factor
1	800, 820, 840, 860	0.1	0.03
2	840	0.01, 0.1, 0.5, 1	0.03
3	840	0.1	0.03, 0.1, 0.25, 0.7



图 3 变形速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.03 时 TC18 钛合金圆盘不同变形温度下的温度场分布图

Fig. 3 Temperature distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different temperatures and deformation rate of 0.1 mm/s and friction factor of 0.03: (a) 800 °C; (b) 820 °C; (c) 840 °C; (d) 860 °C



图 4 变形速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.03 时 TC18 钛合金圆盘不同变形温度下的等效应力分布图 Fig. 4 Effective-stress distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different temperatures and deformation rate of 0.1 mm/s and friction factor of 0.03: (a) 800 °C; (b) 820 °C; (c) 840 °C; (d) 860 °C



图 5 变形速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.03 时 TC18 钛合金圆盘不同变形温度下的等效应变分布图 Fig. 5 Effective-strain distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different temperatures and deformation rate of 0.1 mm/s and friction factor of 0.03: (a) 800 °C; (b) 820 °C; (c) 840 °C; (d) 860 °C

形温度达到 860 ℃时,温升效应导致锻件实际变形温 度极其接近合金相变点,合金由密排六方结构向体心 立方结构转变的程度加剧,使其更加易于变形,锻件 等效应变反而呈上升趋势(见图 5(d))。此外,由温升 效应引起的温度升高、直至越来越接近合金相变点, 导致合金热稳定性逐渐下降,锻件局部区域应变上升, 最大等效应变与最小等效应变之间的差值呈先减小后 增大的趋势,860 ℃时,最大和最小等效应变的差值 又增加至3.73。

图 6 所示为变形速率 0.1mm/s、摩擦因数 0.03、 不同变形温度下坯料的行程—载荷图(注:采用 1/4 建 模,相应所获得的载荷需乘以 4,下同)。由图 6 可以 看出,随着变形温度的升高,合金软化程度增强,变 形抗力降低,模锻所需锻造压力呈下降趋势,从 800 ℃ 的 880 kN 下降至 860 ℃的 560 kN。从模拟结果中可 以发现,TC18 合金在 800 ℃以上进行等温锻造时,840 ℃对应的锻造压力较 820 ℃的有显著降低,而继续提 高温度对降低锻造压力的效果减弱,反而有可能因温 升效应导致坯料实际温度超过合金相变点,因此,在 本研究后续模拟中采用 840 ℃的锻造温度。

2.2 变形速率的影响

图 7 所示为变形温度 840 ℃、摩擦因数 0.03、不 同变形速率下坯料的温度场分布图。由图 7 所示,随 着变形速率的增加,坯料内部变形和温度分布的不均 匀性程度加剧,由此带来的剧烈变形导致盘件表面凹 凸台以及圆角区域产生更多变形热,温度急剧上升: 锻件内最大温升分别由变形速率 0.01 mm/s 时的 1.3 ℃升至 1 mm/s时的23.2 ℃;而当变形速率达到 1 mm/s 时,锻件最高温度 863.2 ℃已经接近合金的相变点(见 图 7(d))。另外,变形速率增加以后,变形过程经历的 时间相应变短,即会减少变形过程中由于热传递作用



图 6 变形速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.03 时 TC18 钛合 金圆盘不同变形温度下行程一载荷曲线

Fig. 6 Stroke—load curves of TC18 Ti alloy disc at deformation rate of 0.1 mm/s and friction factor of 0.03

散失的热量,从而使得锻件内部的最低温度升高:由 变形速率 0.01 mm/s 时的 840 ℃上升至 1 mm/s 时的 852.2 ℃。

图 8 和 9 所示为变形温度 840℃、摩擦因数 0.03、 不同变形速率下坯料的等效应力、应变场分布图。由 图 8 可以看出,随着变形速率的增加,变形时间变短, 模锻过程中合金的再结晶软化来不及完成,即存在较 大的变形抗力,导致等效应力随之增大,由变形速率



图 7 当变形温度为 840 ℃、摩擦因数为 0.03 时 TC18 钛合金圆盘不同变形速率下的温度场分布图

Fig. 7 Temperature distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different deformation rates and deformation temperature of 840 °C and friction factor of 0.03: (a) 0.01 mm/s; (b) 0.1 mm/s; (c) 0.5 mm/s; (d) 1 mm/s



图 8 当变形温度为 840 ℃、摩擦因数为 0.03 时不同变形速率下 TC18 钛合金圆盘的等效应力分布 Fig. 8 Effective stress distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different deformation rates and deformation temperature of 840 ℃ and friction factor of 0.03: (a) 0.01 mm/s; (b) 0.1 mm/s; (c) 0.5 mm/s; (d) 1 mm/s





0.01 mm/s 时的 117 MPa 增加至 1 mm/s 时的 228 MPa。 由图 9 可看出,随着变形速率的增加,坯料等效应变 逐渐增大,最大等效应变与最小等效应变的差值也逐 渐增加,分别为变形速率 0.01 mm/s 时的 3.68、0.1 mm/s时的 3.70、0.5 mm/s时的 4.42 以及 1 mm/s时的 4.59,即变形越来越不均匀。这是由于变形速率越高,温升效应越显著,由变形产生的热量来不及消散,使得锻件各部位的温度分布不均匀,在表面凹凸台以及

圆角这些难以成形的区域形成较大的温度梯度,容易 造成合金在这些区域的填充能力降低,锻件的最大、 最小应变差也随之增加。

图 10 所示为变形温度 840 ℃、摩擦因数 0.03 时 TC18 钛合金圆盘不同变形速率下坯料的行程—载荷 图。由图 10 可知,随着变形速率的提高,钛合金在高 速率变形下再结晶软化作用来不及发生,即来不及抵 消前期变形产生的加工硬化,进而导致其变形抗力显 著增大,模锻所需要的锻造压力呈上升趋势,从变形 速率 0.01 mm/s 时的 400 kN 上升至 1 mm/s 时的 1 240 kN。模拟结果表明,变形速率的降低有利于减小模锻 所需锻造压力,但是相应延长了模锻所需时间:采用 较低的 0.01 mm/s 变形速率时,所需的锻造压力最小 (400 kN), 而完成模锻所需的时间最长(1 600 s), 但合 金成形性并没有得到显著改善,反而会增加锻造能耗; 而采用较高的1mm/s变形速率时,则可能因温升效应 导致坯料实际温度超过合金相变点。为此,在后续研 究中采用了 0.1 mm/s 的变形速率,此时,所需锻造压 力为 660 kN, 完成模锻所需时间为 160 s, 且合金成 形性也较好。

2.3 摩擦因数的影响

图 11 所示为变形温度 840 ℃、变形速率 0.1 mm/s 不同摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的温度场分布。等 温模锻中需要采用玻璃润滑剂降低坯料与模腔之间的





Fig. 10 Stroke—load curves of TC18 Ti alloy disc at deformation temperature of 840 °C and friction factor of 0.03

摩擦,其中玻璃润滑剂完全玻璃化以后的接触摩擦因 数最低可达到 0.03^[23-24],玻璃化不完全为 0.1,机油、 润滑脂等其他润滑剂为 0.25,以及无润滑状态为 0.7。 如图 11 所示,随着摩擦因数的降低,表层金属与模具 之间的相对滑动能力增强,由摩擦所产生的热量相应 减少,坯料的最大温升由摩擦因数 0.7 时的 10.8 ℃下 降至 0.03 时的 5.3 ℃,锻件表面温度分布更加均匀, 表面温差由摩擦因数为 0.7 时的 8.8 ℃下降到摩擦因 数为 0.03 时的 1.3 ℃。此外,锻件在变形较大区域(见



图 11 当变形温度为 840 ℃、变形速率为 0.1 mm/s 时不同摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的温度场分布图
Fig. 11 Temperature distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different friction factors and deformation temperature of 840 ℃ and deformation rate of 0.1 mm/s: (a) 0.03; (b) 0.1; (c) 0.25; (d) 0.7

图 11(a)区域 1 处)的成形效果得到显著改善。

图 12 和 13 所示分别为变形温度 840 ℃、变形速 率 0.1 mm/s 不同摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的等效 应力、应变场分布图。从图 12 和 13 中可以发现,变 形区的等效应力随着摩擦因数的增加而增大,由摩擦 因数 0.03 时的 165MPa 增加至 0.7 的 212 MPa。变形 区等效应变随着摩擦因数的增加而减小,由摩擦因数 0.03时的3.76下降至0.7的3.18,最大等效应力和应 变都集中在难变形的表面凹凸台以及圆角处。摩擦形 成的本质是合金在塑性流动过程中其表面与模具表面 产生相对滑动,并引起锻件表层受到强烈剪切应力而 变形。合金表层由于受到摩擦力的阻碍作用,导致模



图 12 当变形温度为 840 ℃、变形速率为 0.1 mm/s 时不同摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的等效应力场分布图 Fig. 12 Effective-stress distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different friction factors and deformation temperature of 840 ℃ and deformation rate of 0.1 mm/s: (a) 0.03; (b) 0.1; (c) 0.25; (d) 0.7



图 13 当变形温度为 840 ℃、变形速率为 0.1 mm/s 时不同摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的等效应变场分布图 Fig. 13 Effective-strain distribution of TC18 Ti alloy disc deformed at different friction factors and deformation temperature of 840 ℃ and deformation rate of 0.1 mm/s: (a) 0.03; (b) 0.1; (c) 0.25; (d) 0.7

锻过程中变形抗力增大,等效应力也随之增大。等效 应变之所以降低,是由于变形抗力增大导致合金的变 形过程更加困难,而摩擦因数的增加意味着在难变形 区域会存在更大的摩擦阻力阻碍合金的流动,使得合 金在这些区域的变形性及填充性大幅下降。

图 14 所示为变形温度 840 ℃、变形速率 0.1 mm/s 不同摩擦因数下TC18 钛合金圆盘的行程—载荷曲线。 由图 14 可看出,随着摩擦因数的提高,导致等温锻造 过程中摩擦力相应增大,阻碍了合金在模腔中的流动 性,同时也提高了变形过程中坯料的附加应力,使得 模锻所需锻造压力呈急剧上升趋势,从 660 kN 上升至 2 160 kN。由模拟结果可知,在模锻过程中,选择合 适的润滑剂是十分必要的。采用玻璃润滑剂,无论其 玻璃化良好与否(0.03~0.1),都能显著降低锻造压力, 而在模锻中不使用润滑剂,对设备吨位需求提高了 3.3 倍,因此,在试验中应尽量选择玻璃润滑剂,以减小 模具和坯料之间的摩擦,从而提高锻件的变形性能以 及模具使用寿命。



图 14 当变形温度为 840 ℃、变形速率为 0.1 mm/s 时不同 摩擦因数下 TC18 钛合金圆盘的行程—载荷曲线

Fig. 14 Stroke—load curves of TC18 Ti alloy disc at deformation temperature of 840 $^{\circ}$ C and deformation rate of 0.1 mm/s

3 等温模锻试验验证

上述有限元模拟结果表明,变形温度 840 ℃、变 形速率 0.1 mm/s、摩擦因数 0.03 为相对合理的变形条 件。为了验证模拟的准确性,本文作者进行了相关等 温模锻试验验证:首先将 TC18 合金锻块加工成与模 拟过程中所使用模型一致的坯料(见图 15(a));然后在 其表面涂覆一层 T_{xy}-1 型玻璃润滑剂(北京天力创有限 公司生产),将其与模具整体装配好(见图 15(b)),周围 包裹石棉保温层以后,置入电阻丝炉中加热至 840 ℃ 并保温 2 h;最后在液压机上进行等温模锻,其中模锻 条件为变形速度 0.1 mm/s,预置压力为 400 kN 和 1 000 kN,所得锻件分别如图 16 和 17 所示。



图 15 初始坯料与模具装配示意图 Fig. 15 Assembly of initial billet(a) and mold(b)



图 16 在 400 kN 锻造压力下模拟与试验结果 Fig. 16 Results of forging disc forged at pressure of 400 kN: (a) Simulation; (b) Experiment



图 17 在1000 kN 锻造压力下实际锻件图 Fig. 17 Experiment results of forging disc forged at pressure of 1 000 kN: (a) Upper surface; (b) Lower surface

图 16(a)中给出的模拟结果显示,在 400 kN 的压 力下,因锻造压力不足,不能获得与设计一致的锻件, 且图 16(b)中试验结果也出现了因锻造压力不足导致 合金未能充分流动填充模腔的现象,表面未能形成完 整凸台,其最终直径仅为 50 mm,未能满足设计要求。 当锻造压力升至 1 000 kN 时,如图 17 所示,锻造所 得盘件轮廓清晰,金属流线分布较为合理,锻造尺寸 与轮廓与模拟结果基本吻合。可见,本研究中有限元 模拟结果与具体试验基本吻合,能够较好地指导 TC18 钛合金盘件的模锻制备工艺。

3 结论

 升高变形温度能降低 TC18 合金的模锻压力, 提高合金变形均匀性,其中在 800 ℃以上进行等温锻 造时,840 ℃对应的锻造压力较 820 ℃有显著降低, 而继续提高温度对降低锻造压力的效果不大,反而有 可能因温升效应导致坯料实际温度超过合金相变点, 因此,变形温度 840 ℃为该合金合适的等温模锻温度。

 2)降低变形速率有利于减小模锻压力,但会延长 模锻时间,并且合金成形性并未得到显著改善,而选 择较快的变形速率则会增加模锻压力,并且有可能因 温升效应导致坯料实际温度超过合金相变点。

3) 在锻造过程中需要选取具有低摩擦因数的模 锻润滑剂,才能够大幅减小模锻压力,提高合金的变 形均匀性,同时减弱变形过程中的温升效应。在模锻 试验过程中,通过采用摩擦因数 0.03 的玻璃润滑剂, 在锻造压力 1 000 kN、变形温度 840 ℃、变形速率 0.1 mm/s 的条件下,成功制备出与设计要求一致的 TC18 缩比盘件,其试验结果与模拟结果能够较好吻合。

REFERENCES

 [1] 焦 园,刘 东,刘 杰,孙二举.盘类锻件轴向碾轧成形过 程中的工艺参数优化[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(13): 65-68.

JIAO Yuan, LIU Dong, LIU Jie, SUN Er-ju. Optimization of process parameters for ACDR process of disk forging[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(13): 65–68.

- [2] BOYER R, WELSCH G, COLLINGS E W. Materials properties handbook: Titanium alloys[M]. Metals Park, OH: ASM International, 1994: 767–1006.
- [3] MOISEYEV V N. Titanium alloys-russian and aerospace application[M]. Oxfordshire: Taylor & Francis Group, 2006: 119–196.
- [4] RODNEY B, RODNEY E, LUT JERING G. The use of β titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 103–114.

[5] 赵红霞. 航空用高强度 BT22 钛合金的研发和应用[J]. 航空制 造技术, 2010, 1: 85-87.
ZHAO Hong-xia. Development and application of high strength titanium alloy BT22 in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 1: 85-87.
[6] 罗 雷, 毛小南, 杨冠军, 牛蓉蓉. BT22 钛合金简介[J]. 材料

热处理技术, 2009, 38(14): 14-17. LUO Lei, MAO Xiao-nan, YANG Guan-jun, NIU Rong-rong. Brief introduction for BT22 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(14): 14-17.

[7] 韩 栋,张鹏省,毛小南,卢亚锋,奚正平,杨建朝. BT22 钛
 合金及其大型锻件的研究进展[J]. 材料导报,2010,24(2):
 46-50.

HANG Dong, ZHANG Peng-sheng, MAO Xiao-nan, LU Ya-feng, XI Zheng-ping, YANG Jian-chao. Research progress of BT22 titanium alloy and its large forgings[J]. Materials Review, 2010, 24(2): 46–50.

[8] 庞克昌. 航空锻件精化的重要途径一等温锻造技术[J]. 金属 学报, 2002, 38(S1): 356-359.

PANG Ke-chang. Isothermal forging technology for precision forging of aerospace material[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002,

38(S1): 356-359.

 [9] 曲银化,孙建科,孟祥军. 钛合金等温锻造技术研究进展[J]. 钛工业进展,2006,23(1):6-9.
 QU Yin-hua, SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun. Research and

development of isothermal forging of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(1): 6–9.

- [10] SRINIVASAN N, RAMAKRISHNAN N, VENUGOPAL R A, SWAMY N. CAE for forging of titanium alloy aero-engine disc and integration with CAD-CAM for fabrication of the disc[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(3): 353–359.
- [11] 朱 磊, 张麦仓, 董建新, 庞克昌. TC11 合金本构关系的建立 及其在盘件等温锻造工艺设计中的应用[J]. 稀有金属材料与 工程, 2006, 35(2): 253-256.
 ZHU Lei, ZHANG Mai-cang, DONG Jian-xin, PANG Ke-chang. Constitutive relationship of TC11 alloy and its application in hot die forging process of disc component using finite element

method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(2): 253–256.

[12] 陈希凯,李付国,张李骊,彭富华,黄永胜.基于组织均匀性 目标的 TC4 合金盘件等温成形工艺优化[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(6): 46-51.

CHEN Xi-kai, LI Fu-guo, ZHANG Li-li, PENG Fu-hua, HUANG Yong-sheng. Optimization design based on microstructure uniformity in isothermal forging process for titanium alloy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2006, 36(6): 46–51.

- [13] YU Min, LUO Ying-she, PENG Xiang-hua, QIN Yin-hui. Numerical simulation and its application of rheological forming of titanium alloy vane disk[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2):671–675.
- [14] LI Xiao-li, LI Miao-quan. FE simulation for the forging process of TC6 alloy disc utilizing a microstructural model[J]. Materials Characterization, 2005, 55(4/5): 362–370.
- [15] 张鹏省, 毛小南, 韩 栋. 航空航天用钛合金盘件开发与应用[J]. 钛工业进展, 2011, 28(3): 6-8.
 ZHANG Peng-sheng, MAO Xiao-nan, HAN Dong. Research and development of titanium alloys discs for aerospace and space[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(3): 6-8.
- [16] ZHU Yan-chun, ZENG Wei-dong, MA Xiong, TAI Qing-an, LI Zhi-hua, LI Xiao-guang. Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM[J]. Tribology International,

2011, 44(12): 2074-2080.

- [17] 瓦利金 N.莫依谢耶夫,董宝明,张 胜,郭德伦,梁慧凤, 朱知寿. 钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 75-79.
 MOISEYEV V N, DONG Bao-ming, ZHANG Sheng, GUO De-Lun, LIANG Hui-feng, ZHU Zhi-shou. Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications[M]. Beijing: Aircraft Industry Press, 2008: 75-79.
- [18] BOYER R, EYLOND R. Application of beta titanium alloys in airframes[R]. Beta Titanium Alloys in the 1990's, Titanium Committee. Warendate, PA: TMS, 2003: 335–346.
- [19] 黄伯云,王德志.中国材料工程大典—有色金属材料工程[M]. 北京:化学工业出版社,2006:54-107.
 HUANG Bai-yun, WANG De-zhi. China materials engineering canon—Non-ferrous metal materials engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 54-107.
- [20] ZENER C, HOLLOMOM J H. Effect of strain-rate upon the plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 15(1): 22–27.
- [21] SELLARS C, MCTEGART W. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1966, 14(9): 1136-1138.
- [22] 杨松涛,李继文,魏世忠,徐流杰,张国赏,张二召.纯钼板 坯高温塑性变形行为及本构方程[J]. 中国有色金属学报, 2011,21(9):2126-2131.
 YANG Song-tao, LI Ji-wen, WEI Shi-zhong, XU Liu-jie, ZHANG Guo-shang, ZHANG Er-zhao. Pyroplastic deformation behavior of pure molybdenum plate slab and constitutive equation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2126-2131.
- [23] 李 飞, 吴伏家. TC4 钛合金等温锻造工艺数值模拟[J]. 机械 工程与自动化, 2008, 147(2): 74-75.
 LI Fei, WU Fu-jia. Numerical simulation of isothermal forging process of TC4 titanium alloy[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008, 147(2): 74-75.
- [24] 吴伏家, 尹晓霞, 赵长瑞. TC4 钛合金等温锻造过程的数值模 拟和实验研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(5): 147-150.
 WU FU-jia, YIN Xiao-xia, ZHAO Chang-rui. Numerical simulation and experiment of isothermal forging process of TC4 titanium alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2009, 34(5): 147-150.

(编辑 李艳红)