

TC4 钛合金细丝拉拔有限元模型建立及仿真分析

张国朋 姜飞龙 许佩敏 段博译
(西安菲尔特金属过滤材料股份有限公司)

摘 要 基于 ABAQUS 软件模拟了 $\phi 0.5$ mm TC4 钛合金细丝拉拔过程。结果表明,沿试样轴向,在试样和模具压缩锥接触区域残余应力较大;沿试样径向,残余应力最小值分布区域随着模具压缩角发生改变。随着压缩率增加,试样外侧残余应力最大值分布区域增加。压缩率大于 50% 时,试样断裂。拉拔温度随着模具压缩角和压缩率的增大而增加。实际生产时设置道次压缩率小于 20%,总压缩率小于 50%,模具压缩角小于 25° 最为合适。

关键词 TC4 钛合金仿真;模具压缩角;压缩率;残余应力;拉拔温度

中图分类号 TP311;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Establishment and Simulation Analysis of Finite Element Model for TC4 Titanium Alloy Filament Drawing

Zhang Guopeng, Jiang Feilong, Xu Peimin, Duan Boyi
(Xi'an Filter Metal Materials Co., Ltd.)

Abstract: Based on the ABAQUS software, drawing process of the TC4 titanium alloy with $\phi 0.5$ mm filament was simulated. The results indicate that along the workpiece axis, the residual stress is greater in the contact area between the workpiece and the mold compression cone, while along the workpiece radial direction, distribution area of the minimum residual stress varies with the mold compression angle. As the compression rate increases, the distribution area of maximum residual stress outside the workpiece is increased. When the compression rate is greater than 50%, the workpiece is cracked. The drawing temperature is increased with increase of mold compression angle and compression ratio. In actual production, it is more suitable for the pass compression rate less than 20%, the total compression rate less than 50%, and the mold compression angle less than 25° .

Key Words: TC4 Titanium Alloy Simulation, Die Compression Angle, Compression Ratio, Residual Stress, Drawing Temperature

TC4(Ti-6Al-4V)钛合金因其优良的耐蚀性、密度小、比强度高、韧性好等,在航空航天、石油化工等领域得到广泛应用^[1,2]。TC4 钛合金细丝因具有良好的超塑性、无毒等性能,在医疗器械领域,作为手术过程中的引线广泛应用^[3,4],且其自身良好的焊接性、磁性等性能,在焊接领域、无线电领域逐渐展现其潜在优势^[5]。钛合金丝材加工方法主要有旋锻、轧制和拉拔^[6],由于旋锻和轧制在加工细丝时,难以保证其表面品质,因此常采用拉拔的方法,但是由于钛合金细丝导热性差、弹性模量小,在拉拔过程中应力和热效应的作用下,金属熔覆会粘附在模具上,导致润滑不足,线材表面出现划痕,最终导致线材断裂^[7~10]。目前对于 TC4 合金的研

究大多集中在切削加工仿真上^[11,12],而对于 TC4 合金的拉拔仿真研究较少^[13]。因此,建立合适的有限元仿真模型,分析拉拔过程中 TC4 钛合金细丝的应力和温度变化,对优化拉拔工艺,提高拉拔品质具有重要意义。本课题基于 ABAQUS 有限元分析软件,建立了 TC4 细丝拉拔的有限元模型,分析了模具压缩角和压缩率对其残余应力和拉拔温度的影响,为后续 TC4 细丝拉拔过程工艺参数优化提供参考。

1 有限元模型建立

以 TC4 钛合金为研究对象,其密度为 4.5 g/cm^3 ,弹性模量为 115 GPa,泊松比为 0.7,剪切模量为 42.9

收稿日期:2021-01-04;修改稿收到日期:2021-01-20

第一作者简介:张国朋,男,1983 年出生,助理工程师,西安(710000),E-mail:zhang-guo-peng@163.com

通信作者:姜飞龙,男,1993 年出生,工程师,西安(710000),E-mail:18729380286@163.com

引用格式:张国朋,姜飞龙,许佩敏,等. TC4 钛合金细丝拉拔有限元模型建立及仿真分析[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):751-754.

ZHANG G P, JIANG F L, XU P M, et al. Establishment and simulation analysis of finite element model for TC4 titanium alloy filament drawing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):751-754.

GPa,屈服强度为 300 MPa^[14],考虑到仿真为干摩擦,因此摩擦因数定义为 0.2。

1.1 仿真模型建立

图 1 为拉板几何和仿真模型示意图。拉拔模具由入口区、压缩区、定径区和出口区组成,见图 1a,由于入口区主要影响润滑液的进入情况,仿真过程中无法加入润滑液,因此在有限元建模时,将模具模型进行简化,保留压缩区、定径区和出口区。试样初始直径定义为 1 mm,长度为 6 mm,模型设置为轴对称变形体,通过装配位置调整得到 TC4 钛合金细丝和模具拉拔仿真模型,为更形象呈现建模模型,模型显示角度选为 270°,见图 1b。

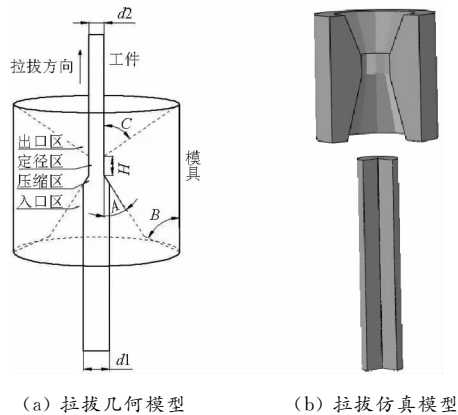


图 1 拉拔几何和仿真模型示意图

1.2 网格划分

试样和模具的网格划分见图 2。为使加工过程更加理想,试样采用自适应网格划分方法,试样尺寸为 $\phi 1\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,网格总数为 3 400 个,细化模具与试样接触区域,仿真时,需分析拉拔过程中模具所受拉力、试样残余应力以及试样温度的变化,因此在定义网格元素属性时,需分别定义为显式-轴对称应力和显式耦合温度-位移。由于在拉拔过程中,主要分析 TC4 钛合金细丝的变化,不再对模具在拉拔过程中的变化进行分析,且拉拔模具一般为金刚石,不会出现模具崩裂等现象,因

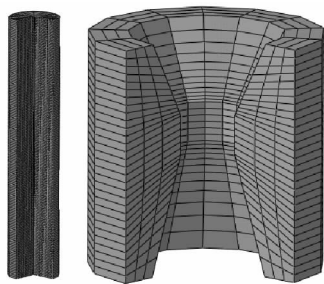


图 2 试样和模具网格划分图

此本次模型将模具设置为刚体。

1.3 试验验证

采用水箱拉丝机进行 TC4 钛合金细丝拉拔,将测力仪固定在模具和模盒之间,在 TC4 钛合金细丝拉拔过程中,模具所受的力为拉拔力 F_a 。钛合金丝直径为 1 mm,模具压缩角 θ 选择 10° 和 15° ,压缩率选择 8% 和 12%。测试拉拔过程中,模具所受的拉力,与拉拔仿真过程进行比较,见表 1。可以看出,拉拔过程中,模具受力的试验值略大于仿真值,最大误差为 5.88%,小于允许误差 10%,并分析了试验和仿真过程中,拉拔力随时间的变化情况。从拉拔过程来看,试验时,拉拔力随时间变化较为平缓,仿真时,拉拔力随时间变化波动较大,这是由于仿真模型为无数个网格划分而成,随着仿真的进行,网格不断发生变形,在网格与网格交接处以及刚开始仿真、仿真进行,以及仿真临近结束时,网格变形有差异,且分析过程是按分步设置的,不具有连续性,而实际拉拔过程是连续的,无波动,因此仿真力相对于试验力波动大。

表 1 模具拉力试验值与仿真值

Tab.1 Experimental and simulated values of mold tension					
序号	压缩角/(°)	压缩率/%	试验力/N	仿真力/N	误差/%
1	10	8	357	336	5.88
2	10	12	800	766	4.25
3	15	8	320	309	3.43
4	15	12	780	756	3.07

2 试验结果及分析

2.1 模具压缩角和压缩率对残余应力的仿真分析

2.1.1 模具压缩角对残余应力的仿真分析

图 3 为不同模具压缩角拉拔下的残余应力分布。其中拉拔速度为 60 m/min,压缩率为 10%。可以看出,TC4 钛合金拉拔过程中,残余应力最大值主要集中在试样进入模具处和试样表面,但是每个区域分布情况不相同,因此对试样残余应力分布分 4 个阶段进行分析。第 1 阶段,试样与压缩锥接触前,残余应力最开始在试样中心处产生,后逐渐向试样两侧扩散,在和模具压缩锥接触之前,残余应力在试样上的分布呈倒立椭圆型;第 2 阶段,试样与压缩锥进行接触,在该过程中试样实现减径,试样压缩变形最大,残余应力在该处也较大;第 3 阶段,试样与定径带接触,在该过程中,主要是对试样进行最终的定径,试样变形相对较小,在定径带区域,沿试样轴向,残余应力逐渐减小,见图 3;第 4 阶段,试样拉出模具,在该过程中,试样上的残余应力会逐渐减弱,沿试样径向,残余应力最大值分布在试样外表面,最小值分布在试样中心处和外表面之间,未出现在中心。

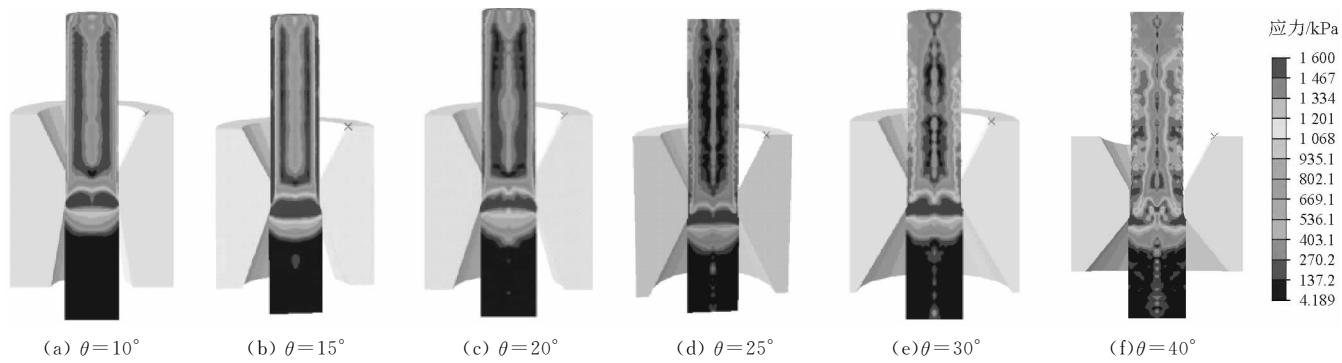


图 3 不同模具压缩角拉拔下的残余应力分布图

Fig.3 Residual stress distribution under different die compression angle drawing

这是由于第 1 阶段残余应力首先在中心处产生有关,由于细丝在拉拔过程中,在模具压缩角处,为细丝和模具的初始接触位置,此过程中,细丝受到沿压缩角方向和垂直压缩角方向的力,通过图 3 中的残余应力云图可以发现,在压缩角大于 25°时,细丝所受残余应力最小值分布区域向中间靠拢,且残余应力最大值分布区域逐渐增加,残余应力分布区域越多,越不利于细丝拉拔后的后续加工,因此建议模具压缩角小于 25°。对试样拉出模具后,不同压缩角下试样残余应力沿径向分布进行分析,见图 4 和图 5。

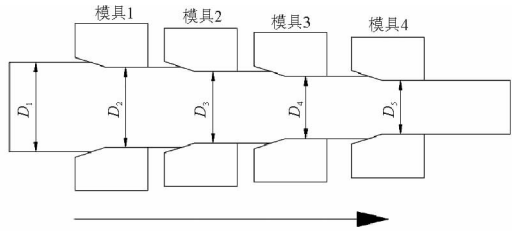


图 6 试样拉拔示意图

Fig.6 Schematic diagram of workpiece drawing

$$W_{道} = \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{总} = \frac{D_1^2 - D_5^2}{D_1^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, D_1 为试样拉拔前直径,mm; D_2 为试样首次拉拔后直径,mm; D_5 为试样拉拔后的成品直径,mm。

为研究 TC4 合金拉拔过程中压缩率对残余应力的影响,拉拔速度控制在 60 m/min,模具角度选择为 20°,将压缩率分别设置为 8%、20%、50%,仿真结果见图 7。可以看出,随着压缩率增大,试样被拉长长度增加,在试样被拉拔出模具后,残余应力最大值分布区域主要在试样最外侧,且随着压缩率的增加,残余应力分布从试样表面向中心逐渐扩散,继续提高压缩率至 50%时,试样出现拉拔不成型现象,即实际生产中的拉拔断线,因此压缩率为 50%时,已经完全不能生产,这说明 TC4 细

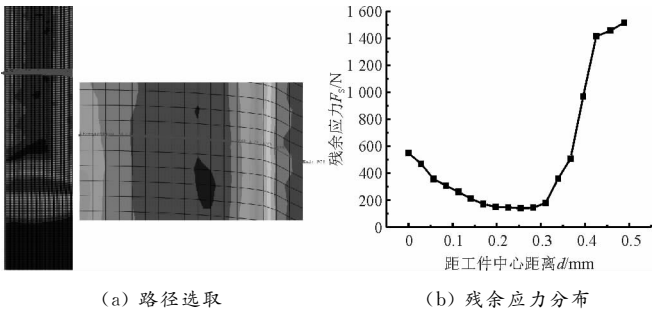


图 4 $\theta=20^\circ$ 时试样的残余应力沿试样径向分布图

Fig.4 The radial distribution of residual stress with $\theta=20^\circ$

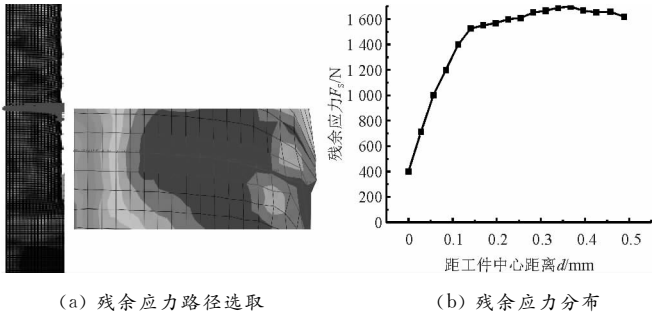


图 5 $\theta=40^\circ$ 时试样残余应力沿试样径向分布图

Fig.5 The radial distribution of residual stress with $\theta=40^\circ$

2.1.2 压缩率对残余应力的影响

压缩率分为道次压缩率 $W_{道}$ 和总压缩率 $W_{总}$,道次压缩率反应的是丝材经过一个模具拉拔前后直径的变化情况,见图 6。总压缩率反应的是丝材经过几个模具拉拔前后直径的变化情况。

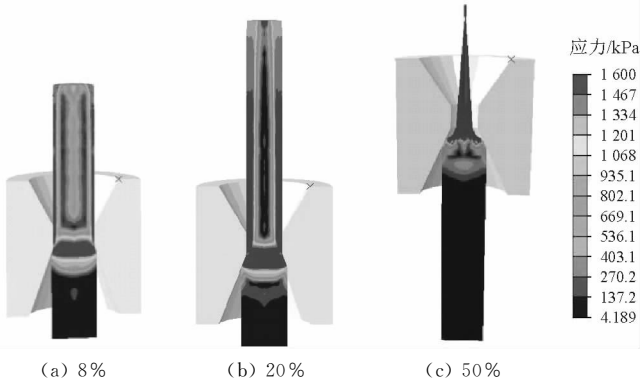


图 7 不同压缩率拉拔下试样的残余应力分布图

Fig.7 Residual stress distribution diagram under different compression rates

丝拉拔时总道次压缩率不能超过 50%。考虑到在加工率为 20% 时,试样残余应力最大值分布区域较多,生产中不建议压缩率过大。在压缩率为 8% 时,试样残余应力最大值分布区域相对较少,比较适合于实际生产,因此在生产过程中,综合考虑生产效率、试样性能,建议单道次压缩率设为 8%~20%,总道次压缩率不超过 50%。

2.2 工艺参数对拉拔温度的影响

2.2.1 模具角度对拉拔温度的影响

基于上述研究,TC4 钛合金细丝拉拔过程压缩率不宜过大,为接近生产实际,压缩率选用 10%,拉拔速度稳定在 60 m/min,由于力学仿真和热学仿真所用模型有所差别,因此需将网格单元属性定义为温度-位移耦合,通过仿真模型,改变模具压缩角,得出了拉拔温度的变化趋势,见图 8。可以看出,模具压缩角为 8° 时,试样仿真最高温度为 26 °C,试验温度为 23 °C。随着模具压缩角增大,试样最高温度增加,当模具压缩角增加至 30° 时,试样仿真温度增加为 45 °C,试验拉拔试样温度为 42 °C,试验和仿真温度趋势相近,且偏差不大,且这和试样拉拔仿真残余应力随模具压缩角变化趋势也较为符合。

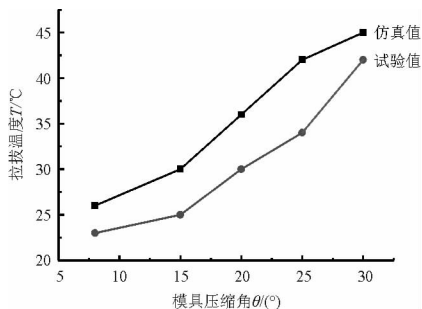


图 8 拉拔温度随模具压缩角变化规律

Fig.8 The variation law of drawing temperature with the mold compression angle

2.2.2 压缩率对拉拔温度的影响

基于前期仿真分析,模具压缩角不易过大,所以模具压缩角选用 10°,且压缩率过大时,试样拉拔不成型,因此将压缩率设为 8%~20%,仿真结果见图 9。可以

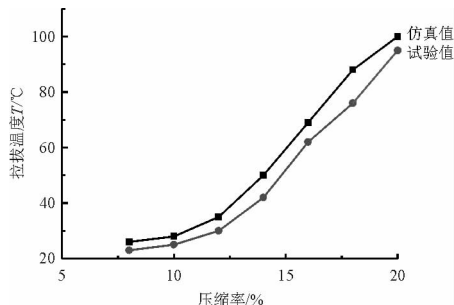


图 9 拉拔温度随试样压缩率变化规律

Fig.9 The variation law of drawing temperature with the compression rate

看出,随着压缩率增加,拉拔仿真温度和试验温度都增加,当压缩率大于 12% 继续增加时,拉拔温度升高较快,且仿真温度略高于拉拔温度,这是由于在试验拉拔时,添加有润滑液,且试验过程中,室温较低,使得拉拔温度会略低于仿真温度。

3 结 论

(1)基于力-位移耦合仿真分析,得出了 TC4 合金试样从进入模具,到拉拔出模具 4 个阶段的残余应力分布情况,当模具角度 $<25^{\circ}$ 时,残余应力最小值不在试样中心处,随着模具角度增大,残余应力最小值越靠近试样中心。

(2)随着压缩率增加,试样被拉长程度增加,表面残余应力最大值分布区域增加,当压缩率达到 50% 时,试样拉拔崩溃不成型,综合不同压缩率残余应力分布情况,建议道次压缩率 $<20\%$,总压缩率 $<50\%$ 。

(3)基于温度-位移耦合关系,得出了模具角度和压缩率对拉拔温度的影响,当模具角度由 10° 增加到 20° 时,仿真拉拔温度由 26 °C 增加到 45 °C,当压缩率由 8% 增至 20% 时,仿真模具温度由 26 °C 增加到 100 °C。

参 考 文 献

- [1] 许爱军,万海峰,梁春祖,等.低温钛合金材料应用现状及发展趋势[J].精密成形工程,2020,12(6): 145-156.
- [2] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].中国有色金属学报,2015,25(2): 280-292.
- [3] 于振涛,余森,程军,等.新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J].金属学报,2017,53(10): 1 238-1 264.
- [4] 王运锋,何蕾,郭薇.医用钛合金的研究及应用现状[J].钛工业进展,2015,32(1): 1-6.
- [5] 张龙,陈东高,张迎迎,等.低成本 TC4 钛合金单丝 MIG 焊工艺与性能研究[J].兵器材料科学与工程,2021(1): 93-97.
- [6] 李树侠,朴松花.钛合金材料的机械加工工艺综述[J].飞航导弹,2007(7): 57-61.
- [7] 蒋志.TC4 钛合金棒线材冷拉拔加工工艺研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2009.
- [8] 崔文俊,郭柏兰,崔斌,等.TC4 钛合金棒材挤压拉拔的金相组织和力学性能演变过程探究[J].锻压技术,2017,42(10): 166-169.
- [9] 宇文鑫. Ti-25Nb-3Mo-3Zr-2Sn 钛合金丝材热拉拔模拟及组织性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [10] 夏麒帆,张松,梁益龙,等.不同拉拔工艺对 TC4 钛合金组织及性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(11): 17-21.
- [11] 鲁世红,何宁.TC4 钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟[J].兵器材料科学与工程,2009,32(1): 5-9.
- [12] 岳彩旭,刘鑫,何耿煌,等.钛合金薄壁件铣削过程有限元仿真分析[J].航空制造技术,2019,62(13): 60-66.
- [13] 梁瑞,马春翔.基于 ANSYS 的拉丝过程有限元仿真研究[J].机械制造与自动化,2020,49(2): 126-129.
- [14] 杨崇秋.钛及钛合金丝的纵扭复合超声振动拉拔仿真及机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

(编辑:刘晨辉)