

# 基于 Deform-3D 钛合金模锻件成形的仿真分析

王 博, 岳战国, 王亚安, 边颖帅, 何正文

(西安航空制动科技有限公司, 陕西 兴平 713100)

**摘要:** 采用 10000 t 液压机制备了钛合金筒形模锻件毛坯, 基于 Deform-3D 软件对其成形过程中出现的局部严重折叠及裂纹问题进行了仿真分析, 同时提出优化坯料结构和增加锻造火次两种解决措施并进行了工艺验证, 通过拉伸试样和冲击试样检测了锻件的室温、高温力学性能, 采用光学显微镜分析了锻件的显微组织。结果表明: 钛合金模锻成形过程中, 金属流线、温度场分布以及等效应变变量的异常, 导致锻件局部存在折叠、裂纹的风险。而通过优化坯料结构和增加锻造火次, 有效控制了锻件成形中的金属流线方向和温度场分布, 从而提高了钛合金在局部位置的成形极限, 避免在成形过程中出现折叠以及裂纹缺陷, 保证了产品质量, 且产品性能满足要求, 进而提高了生产效率。

**关键词:** TC11 钛合金; 筒形模锻件; 金属流向; 锻造火次; 折叠; 裂纹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.004

**中图分类号:** TG319

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0035-06

## Simulation analysis on forming for titanium alloy die forgings based on Deform-3D

Wang Bo, Yue Zhanguo, Wang Ya'an, Bian Yingshuai, He Zhengwen

(Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xingping 713100, China)

**Abstract:** The cylindrical die forgings billet of titanium alloy was prepared by 10000 t hydraulic press, and based on Deform-3D software, the serious local folding and cracking problems occurred in the forming process were simulated and analysed. Then, two solutions of billet structure optimization and forging fire increase were proposed, and the process verification was carried out. Furthermore, the mechanical properties at room temperature and high temperature of forgings were detected by tensile and impact samples, and the microstructure of forgings was analysed by optical microscope. The results show that during the die forging process of titanium alloy, the metal streamline, temperature field distribution and equivalent strain variables are abnormal, which resulting in the risk of folding and cracking in local positions of forgings. By optimizing the billet structure and increasing the forging fire, the distributions of metal streamline direction and temperature field in forging are effectively controlled to improve the forming limit of titanium alloy in local positions, avoid folding and cracking defects in the forming process and ensure the product quality, and the performances of product meet the requirements to improve the production efficiency.

**Key words:** TC11 titanium alloy; cylinderial die forgings; metal flow direction; forging fire; folding; crack

钛及钛合金具有优异的力学性能、良好的耐热性能以及耐腐蚀性能, 同时, 其密度仅为钢和镍基合金的 1/2 左右, 在航空、航天、化工和造船工业应用广泛<sup>[1-2]</sup>。但是又因为钛合金属于难变形材料, 具有敏感的锻造温度、锻造速率以及较窄的锻造温度范围, 并且随着其产品规格的提升以及形状的复杂化, 钛合金作为高性能材料的应用受到了约束<sup>[3]</sup>。

近年来, 研究者们通过大量工作, 细化钛合金的锻造工艺, 以提升其成形极限和力学性能。童晋方等<sup>[4]</sup>通过 Deform-3D 模拟调节芯杆镦头的应变分布, 从而有效地控制了因镦头中心部位变形程度高而造成的镦制缺陷。黄伟等<sup>[5]</sup>通过仿真模拟 TC4 钛合金连接板的抽芯铆接过程, 为后续研究铆接件的力学性能和疲劳寿命奠定了基础, 节约了研究经费。赵满圆等<sup>[6]</sup>通过仿真模拟预测了 GH4169 镍基高温合金双层导管弯曲成形过程的应力分布情况, 从而为实际生产提供了重要的理论指导。因模锻可以极大地提高材料利用率, 在工业中应用广泛, 但是其复杂的成形过程也对其工业应用有着一定的约束。

收稿日期: 2023-08-15; 修订日期: 2023-11-23

作者简介: 王 博 (1995-), 男, 硕士, 工程师

**E-mail:** 447641988@qq.com

通信作者: 岳战国 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师

**E-mail:** 784244507@qq.com

通过仿真软件的应用，从理论上可以优化和减少锻件在模锻成形过程中的风险，从而指导工业的实际生产，减少生产成本，提高生产效率。对于贵金属合金而言，利用仿真软件研究其成形过程更具实际意义。

本文通过 10000 t 液压机制备了钛合金筒形模锻件，基于 Deform-3D 软件研究并分析了其成形中的问题，在此基础上提出了解决措施并进行工艺研究，进一步优化了 TC11 钛合金筒形模锻件的锻造工艺。

1 实验材料与方法

以工业用 TC11 钛合金圆饼为原材料，规格为

$\Phi 310\text{ mm}\times 245\text{ mm}$ ，化学成分如表 1 所示<sup>[7]</sup>，符合 GJB 2218A—2018<sup>[7]</sup>的要求。对原材料进行正反复合挤压的普通模锻，得到锻件并对其进行双重退火热处理。采用高温箱式电阻炉加热坯料和进行高温退火，采用中温淬火炉完成中温退火，采用 10000 t 液压机完成模锻过程，图 1 为坯料和锻件示意图。图 2 为本研究采用的模具示意图。最终从热处理后的锻件上，切取纵向、横向试样块，再按照 GB/T 228.1—2021<sup>[8]</sup>、GB/T 228.2—2015<sup>[9]</sup>、GB/T 229—2020<sup>[10]</sup>加工为标准试样并进行室温、高温拉伸力学实验和室温冲击实验。为了保证实验结果的可重复性和准确性，每组实验准备至少 3 个试样。

表 1 TC11 钛合金的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of TC11 titanium alloy（%，mass fraction）

部位	Al	Mo	Zr	Si	Fe	C	H	N	O	Ti
头部	6.74	3.55	1.74	0.264	0.025	0.010		0.004	0.129	
中部	6.84	3.54	1.78	0.273	—	—	0.001	—	—	余量
底部	6.82	3.59	1.76	0.267	0.026	0.007		0.004	0.132	
GJB 2218A—2018	5.8~7.0	2.8~3.8	0.8~2.0	0.20~0.35	≤0.25	≤0.08	≤0.012	≤0.05	≤0.15	

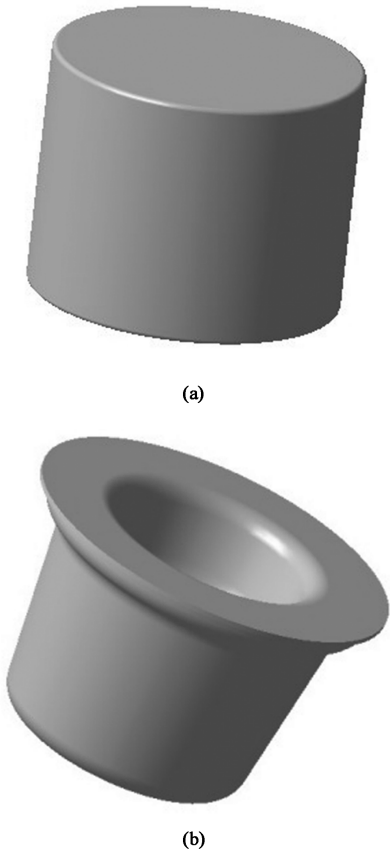


图 1 坯料（a）和锻件（b）示意图  
Fig.1 Schematic diagrams of billet（a）and forgings（b）

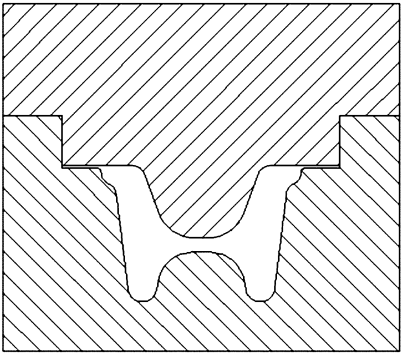


图 2 模具示意图  
Fig.2 Schematic diagram of die

2 结果与分析

2.1 试制工艺及问题

TC11 作为（ $\alpha+\beta$ ）钛合金，其固有的复杂晶体结构以及对工艺参数的敏感，使得其在锻造过程中可以得到 4 种不同的形态组织结构，从而获得不同力学性能的锻件<sup>[11]</sup>。这也导致 TC11 钛合金相对其他合金更加难以加工，属于难变形材料，锻造特点更为苛刻<sup>[3]</sup>。因此，在钛合金的锻造中应严格控制工艺参数，采用合理的锻造方法克服其锻造难点，从而得到预期的锻件。

如图 1 所示，该钛合金筒形锻件的上、下内型腔较深，为了保证锻件顺利出模，锻件内型腔的拔模斜度为  $7^{\circ}$ ，外型腔的拔模斜度为  $5^{\circ}$ ，圆角过渡半径为  $R25\text{ mm}$ 。主要工艺为：下料—清理—润滑—锻造—热处理。主要锻造参数如表 2 所示<sup>[11-15]</sup>，其中， $T_{\beta}$  为材料的  $\beta$  转变温度<sup>[13]</sup>。因为产品需要具有强度、塑性、韧性以及热强性等最优的综合性能，所以选择  $(\alpha+\beta)$  锻造，从而获得双态组织，即锻造温度为  $T_{\beta}-(35\sim 100)^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 主要锻造工艺参数  
Table 2 Main forging process parameters

参数	数值
锻造温度/ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\beta}-(35\sim 100)^{\circ}\text{C}$
锻造速率/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\geq 6$
转移时间/s	$\leq 60$
润滑剂	玻璃润滑剂 (RT-056)
模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\leq 500$
模具保温时间/h	$\geq 12$

图 3 为经工艺试制的锻件实物图，可以看出，在锻件局部出现严重的折叠和裂纹缺陷。具体表现为：距锻件下表面  $40\text{ mm}$  处产生较深的折叠缺陷；锻件的上、下型腔内表面、法兰圆弧过渡处出现不

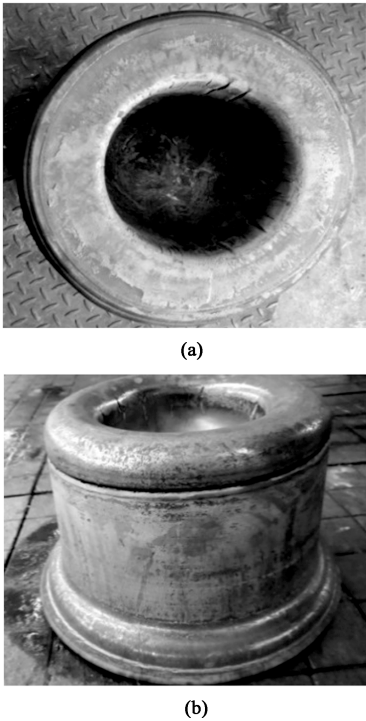


图 3 试制锻件的实物  
(a) 俯视图 (b) 主视图  
Fig. 3 Physical forgings in trial production  
(a) Planform (b) Front view

同程度的裂纹。后续需要通过复杂的车削、打磨工序以及花费大量的时间和代价才可以清除此缺陷，极大地降低了生产效率。

2.2 原因分析及解决措施

2.2.1 缺陷产生的原因分析

基于 Deform-3D 有限元软件进行仿真，分析缺陷产生的原因。采用 CATIA 软件建立计算模型，然后将设计好的 3D 计算模型 (图 4a) 导入 Deform-3D 有限元软件中进行网格划分 (四面体网格数量为 100000)，为提高仿真效率，采用  $1/36$  模型进行仿真。材料选择软件库中接近 TC11 钛合金名义成分的本征参数，并且按照工艺和表 2 所示参数建立仿真环境进行模拟，最后借用软件后处理程序以及点追踪方法进行锻件的成形分析。

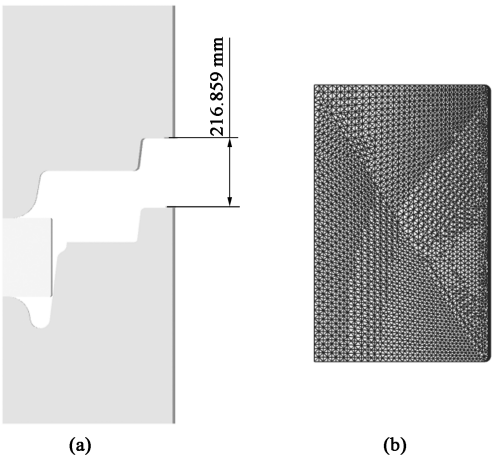


图 4 计算模型 (a) 及网格划分 (b) 示意图  
Fig. 4 Schematic diagrams of calculation model (a) and grid division (b)

图 5 为锻件底部产生严重折叠位置处的温度分布云图。由图 5 可以看出，此时上模下压量为  $120\text{ mm}$ ，此刻锻件底部与模具接触的表层金属温度

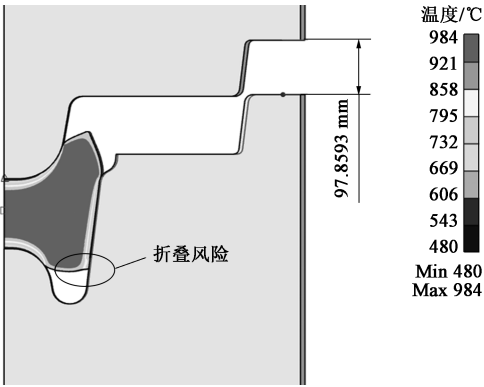


图 5 严重折叠位置的温度分布云图  
Fig. 5 Temperature distribution nephogram at severe folding position

急速下降并且接近模具温度 (440 ℃), 未接触模具的表层金属温度虽然高于 800 ℃, 但是与心部金属温度也存在较大差异。钛合金锻造时有着极强的温度敏感性, 因此, 如此大的温度差异使得此位置存在极大的成形风险。图 6 为此位置锻件的金属流线云图。由图 6 可以明显看出, 此刻锻件的金属流线开始紊乱, 心部金属流线垂直向下, 且流动速率明显大于表层金属的流动速率, 即可能使得后续成形中此位置表层金属流速过慢或粘附模具壁不流动, 而心部金属先充满底部型腔后, 再向模具侧壁运动, 从而形成折叠。

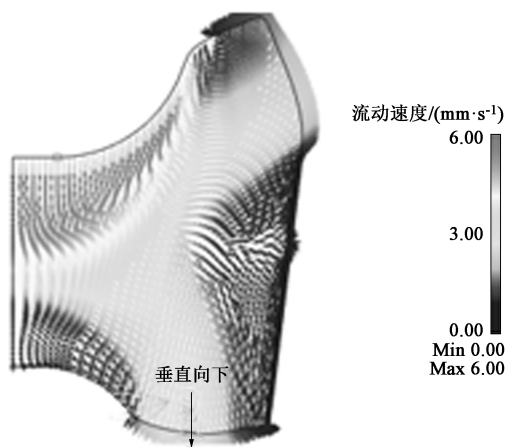


图 6 严重折叠位置的金属流线云图

Fig. 6 Metal streamline nephogram at severe folding position

图 7 为锻件的等效应变云图, 可以看出, 在锻件上、下型腔内表面、法兰圆弧过渡处的等效应变明显大于其他无裂纹区域的等效应变。钛合金本身即具有较大的变形抗力, 而采用普通模锻使得锻件温度降低较快, 无形中增加了变形抗力, 从而更易开裂<sup>[16]</sup>。且在图 3 中, 锻件表面其他区域均无裂纹, 即表明锻件局部随着应变量的增加, 变形抗力增加, 从而产生裂纹。

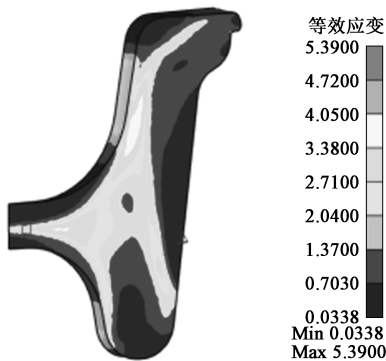


图 7 锻件的等效应变云图

Fig. 7 Equivalent strain nephogram of forgings

## 2.2.2 解决措施

综上所述, TC11 钛合金筒形件成形过程中金属温度分布的异常和变形量过大, 使得锻件产生折叠、裂纹缺陷。因此, 提出 2 种解决措施。

(1) 优化坯料结构。即在锻件底部倒圆角, 以延缓成形过程中坯料底部金属与模具的接触时间, 减小内外层金属间的温度差异, 优化金属流线, 从而尽可能地控制变形失稳, 消除折叠风险。

(2) 增加锻造火次。在锻件金属流线紊乱前对锻件重新加热, 减小温度差异, 从而降低 TC11 钛合金的温度敏感性和减小应变量, 消除产生折叠、裂纹的风险。

按解决措施采用多工序重新进行仿真, 由前文分析可知, 上模下压 120 mm 时, 为折叠产生的风险点, 即在上模下压 120 mm 时增加一步加热仿真工序。按照此流程经多次仿真后发现, 采用如图 8 所示的坯料模型时, 在图 5 所示底部产生折叠的位置明显圆滑过渡, 且表层和心部金属的温度分布更加合理, 折叠风险消除, 如图 9 所示。

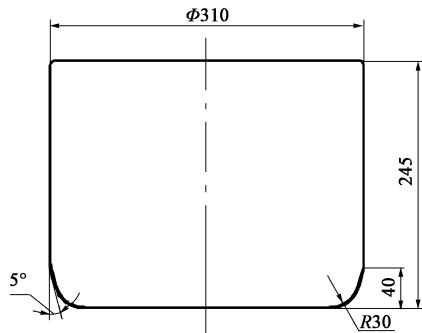


图 8 新坯料计算模型

Fig. 8 New calculation model for billet

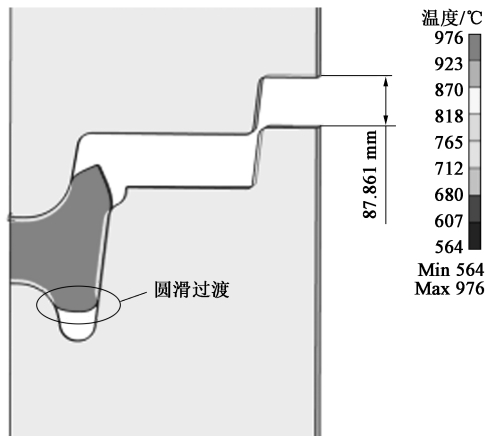


图 9 新仿真流程结果

Fig. 9 Result of new simulation process



图 10 为新仿真流程锻件的金属流线云图。从图 10 中可以看出,锻件的金属流线同图 6 明显不同,金属流线由之前的垂直向下改变为向侧壁流动,即后续成形中此区域心部金属会在表层金属不流动时,先充满侧壁后再向下继续流动,从而消除底部折叠风险。图 11 为新仿真流程锻件的等效应变云图。从图 11 中可以看出,锻件在产生裂纹位置仍具有较大的等效应变,且同图 7 的仿真情况相当。但是之前由一火完成的应变变量现通过两火完成,即在一定程度上减小了锻件的变形抗力,从而降低了裂纹缺陷产生的风险。

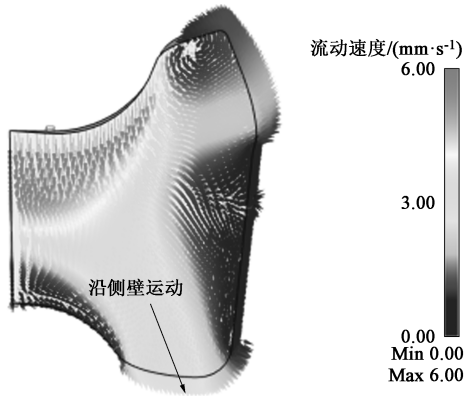


图 10 新仿真流程的金属流线云图  
Fig. 10 Metal streamline nephogram of new simulation process

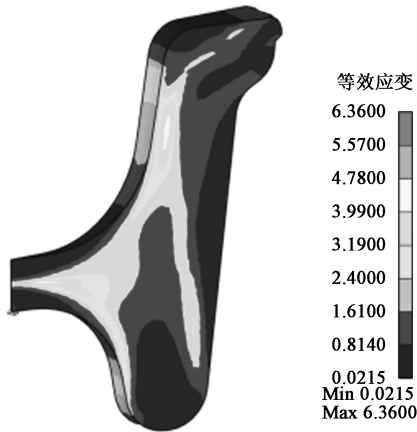


图 11 新仿真流程的锻件等效应变云图  
Fig. 11 Equivalent strain nephogram of forgings in new simulation process

2.3 工艺优化及验证

通过上述分析,将原工艺优化为:下料—清理—润滑—一火模锻—润滑—二火模锻—热处理,下料按图 8 所示加工坯料,一火时进行欠压,欠压量为  $(115\pm 5)$  mm。

图 12 为按照新工艺进行锻造后的实物,可以看出,锻件底部处的折叠缺陷明显消失,且明显削弱了锻件局部裂纹产生的风险,达到了预期目的。图 13 为锻件的显微组织图,钛合金的最终性能由显微组织的形态决定,由图 13 中可以看出,锻件的显微组织为  $\alpha + \beta$  双态均匀组织,符合 GJB 2744A—2019<sup>[17]</sup>的要求。表 3 和表 4 分别为锻件的室温、高温力学性能<sup>[17]</sup>,从表 4 中可以看出,锻件的性能符合 GJB 2744A—2019<sup>[17]</sup>的要求。



图 12 新工艺锻件实物  
Fig. 12 Physical forgings of new process

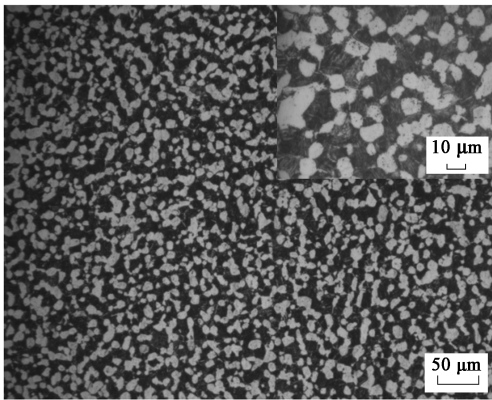


图 13 新工艺锻件的显微组织形貌  
Fig. 13 Microstructure morphology of forgings for new process

表 3 工艺优化后锻件的室温力学性能

Table 3 Mechanical properties of forgings at room temperature after process optimization						
取向	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	伸长率 $A$ /%	断面收缩率 $Z$ /%	冲击功 $A_{kv}$ /J	压痕直径 $d$ /mm
横向	1100	986	14	43	55	$\Phi 3.5$
纵向	1075	994	15	46	46	
GJB 2744A—2019	1030	910	9	25	29.5	$\Phi 3.3 \sim 3.7$

表 4 工艺优化后锻件的高温力学性能

Table 4 Mechanical properties of forgings at high temperature after process optimization

取向	抗拉强度 $R_m$ /MPa	伸长率 $A$ /%	断面收缩率 $Z$ /%	应力 $\sigma$ /MPa	断裂时间 $\tau$ /h
纵向	741	18	57	$\geq 590$	$\geq 100$
GJB 2744A—2019	685	12	40	$\geq 590$	$\geq 100$

### 3 结论

(1) 在钛合金模锻成形过程中, 锻件在局部位置的金属流线、温度场分布和等效应变量的异常, 增加了产生折叠、裂纹的风险。

(2) 基于 Deform-3D 软件, 通过优化 TC11 钛合金锻件的坯料结构和增加锻造火次, 有效地优化了金属流线和温度场的分布, 从而提高了钛合金的成形极限, 解决了局部产生折叠、裂纹的问题, 达到了优化锻造工艺和提高生产效率的目的。

#### 参考文献:

- [1] 张晨辉, 张利军, 郑筠, 等. 钛合金组织与性能调控工程实例 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (8): 1020-1023.  
Zhang C H, Zhang L J, Zheng Y, et al. An engineering example of microstructure and properties control of titanium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (8): 1020-1023.
- [2] 王向明, 刘文斑. 飞机钛合金结构设计与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
Wang X M, Liu W T. Aircraft Titanium Alloy Structure Design and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [3] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变及热处理 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.  
Zhao Y Q, Chen Y N, Zhang X M, et al. Phase Transformation and Heat Treatment of Titanium Alloys [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
- [4] 童晋方, 冯治国, 江玉莲, 等. TB9 钛合金芯杆冷锻成形模拟及实验研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 32-40.  
Tong J F, Feng Z G, Jiang Y L, et al. Simulation and experiment study on cold heading for TB9 titanium alloy core rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 32-40.
- [5] 黄伟, 古忠涛, 陈薄, 等. TC4 钛合金连接板抽芯铆接数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 95-103.  
Huang W, Gu Z T, Chen B, et al. Numerical simulation on core riveting for TC4 titanium alloy connecting plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 95-103.
- [6] 赵满圆, 闫晓东, 贺金宇, 等. GH4169 双层管填充绕弯畸变的数值模拟研究 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (7): 967-976.  
Zhao M Y, Yan X D, He J Y, et al. Numerical simulation on bending distortion of GH4169 double-layer filled tube [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (7): 967-976.
- [7] GJB 2218A—2018, 航空用钛及钛合金棒材和锻坯规范 [S].  
GJB 2218A—2018, Specification of titanium and titanium alloy bars and forging stocks for aircraft [S].
- [8] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [9] GB/T 228.2—2015, 金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法 [S].  
GB/T 228.2—2015, Metallic materials—Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature [S].
- [10] GB/T 229—2020, 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法 [S].  
GB/T 229—2020, Metallic materials—Charpy pendulum impact test method [S].
- [11] 中国机械工程学会. 锻压手册: 锻造 第 1 卷 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Chinese Mechanical Engineering Society. Forging Handbook: Forging Volume 1 [M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] GB/T 23605—2020, 钛合金  $\beta$  转变温度测定方法 [S].  
GB/T 23605—2020, Determination of  $\beta$  transus temperature of titanium alloys [S].
- [13] GB/T 38964—2020, 钛合金等温锻造 工艺规范 [S].  
GB/T 38964—2020, Isothermal forging for titanium alloy—Technological specification [S].
- [14] HB/Z 199—2005, 钛合金锻造工艺 [S].  
HB/Z 199—2005, Forging techniques of titanium alloy [S].
- [15] 张智, 杨佩, 文娜, 等. TC11 钛合金棒材锻造工艺的研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (15): 163-172.  
Zhang Z, Yang P, Wen N, et al. Study on forging process of TC11 titanium alloy bar [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (15): 163-172.
- [16] 王巧云, 张耀虎. 大型钛合金锻件的研制 [J]. 西安航空学院学报, 2002, 20 (3): 60-62.  
Wang Q Y, Zhang Y H. Study of new material TC4 forging [J]. Journal of Xi'an Aerotechnical College, 2002, 20 (3): 60-62.
- [17] GJB 2744A—2019, 航空用钛及钛合金自由锻件和模锻件规范 [S].  
GJB 2744A—2019, Specification for titanium and titanium alloy forgings for aerospace [S].