

Ti-B25 钛合金管材挤压成形数值模拟及实验研究

孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 李修雷, 毛小南, 洪权

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了加快推动 Ti-B25 钛合金在舰船通信系统上的应用, 利用前期构造的本构方程和热加工图优化出的工艺参数, 使用 DEFORM-3D 有限元软件模拟了变形温度 900 °C、应变速率 0.1 s⁻¹ 工艺参数下的管材挤压过程, 并对模拟过程进行了实际挤压验证。结果表明: 在变形温度 900 °C、应变速率 0.1 s⁻¹ 条件下能成功挤压出 $\phi 62$ mm × 12 mm 的 Ti-B25 钛合金管坯, 并且管坯具有良好的表面质量, 组织中存在再结晶晶粒。管坯经过 830 °C/1 h + 600 °C/8 h 固溶时效处理后具有良好的强-塑性匹配, 满足舰船天线管使用要求。

关键词: 船用钛合金; 有限元模拟; 管材挤压; 固溶时效处理

中图分类号: TG376.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)01-025-05

Numerical Simulation and Experimental Study of Extrusion Forming of Ti-B25 Titanium Alloy Pipe

Sun Huamei, Liu Wei, Qi Yunlian, Li Xiulei, Mao Xiaonan, Hong Quan

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: In order to accelerate the application of Ti-B25 titanium alloy in ship communication system, DEFORM-3D finite element software was used to simulate the pipe extrusion process under the deformation temperature of 900 °C and the strain rate of 0.1 s⁻¹ with the constructed constitutive equation and the optimized process parameters in the previous work. And the pipe extrusion experiment of Ti-B25 alloy was performed to validate the results of FE simulation. The results show that the pipe blank of $\phi 62$ mm × 12 mm can be successfully extruded under the deformation temperature of 900 °C and the strain rate of 0.1 s⁻¹. The pipe blank has good surface quality and recrystallized microstructure. After solution aging treatment at 830 °C/1 h + 600 °C/8 h, the pipe blank exhibits good stress-plastic matching, which meets the requirement of the pipes used in the shipboard antenna.

Key words: marine titanium alloy; finite element simulation; pipe extrusion; solution aging treatment

舰船长期暴露在海洋环境中, 对材料的耐腐蚀性有严格的要求。并且舰船在运行过程中要承受大载荷、浮力、冲击力、摇晃惯性力的作用, 因而对材料的强-塑性匹配也提出了更高要求^[1]。钛合金比强度高、耐海水及其他介质腐蚀、疲劳性能好、焊接性能优良, 被视为理想的舰船用材料。另外钛合金的无磁性、良好的透声性特点对潜艇反侦查及声呐系统都具有重要意义^[2]。

国外一些国家已经建立了自己的舰船用钛合金体系。俄罗斯完善了不同强度等级的舰船用钛合金, 并且按照在舰船上的不同用途进行了分类^[3,4]。美国

将航空航天用钛合金开创性地应用在了潜艇、驱逐舰和航母上, 并在此基础上开发了一系列舰船用钛合金^[5]。我国经过几十年的研究, 在舰船用钛合金领域也取得了一定的成果, 形成了 320 ~ 1200 MPa 范围的低、中、高屈服强度的钛合金体系^[6], 但是在舰船钛合金管材应用研究方面还不够完备。目前, 舰船用钛合金管材多以两相钛合金为主, 由于两相钛合金冷加工性能差, 造成管材加工周期长、成本高^[7]。 α 型和近 α 型钛合金虽然冷成形性能好, 但是满足不了管材高屈服强度的使用要求。因此, 西北有色金属研究院自主研发了 Ti-B25 高强 β 钛合金, 以满足舰船天线管的使用要求。

金属塑性成形过程是一个非常复杂的弹塑性变

形过程,既有材料非线性,又有几何非线性,再加上边界接触条件的非线性,使其变形机理变得非常复杂,难以用准确的数学模型进行描述。由于有限元法可以全面地考虑变形过程中材料的动态特性、边界条件和初始条件的影响,并且具有精度高、可虚拟成形过程、能反复计算等优点,因此有限元法成为模拟分析塑性成形过程的有力工具。借助于有限元数值模拟技术,能够直观全面地了解挤压成形过程,节省人力和物力,并以较小的代价在较短的时间内得到优化的工艺方案。

为了加快推动 Ti-B25 钛合金在舰船通信系统上的应用,本研究利用前期构造的本构方程和热加工图优化出的工艺参数^[8,9],使用 DEFORM-3D 软件对管材挤压过程进行数值模拟,并对模拟过程进行实际挤压验证。

1 有限元模型建立

1.1 几何模型

图 1 为挤压坯料和模具示意图。利用 SolidWorks 软件建立坯料、挤压筒、挤压杆的三维模型,然后生成 DEFORM-3D 有限元软件能够识别的 STL 文件。

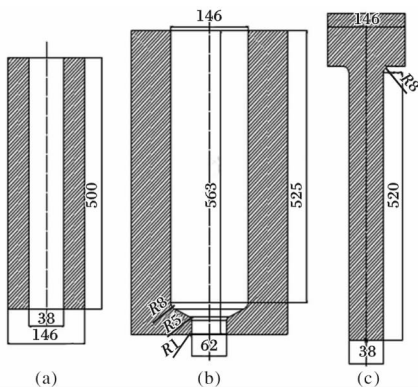


图 1 挤压坯料和模具示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of blank and die for pipe extrusion:
(a) blank; (b) extrusion cylinder; (c) extrusion rod

DEFORM-3D 有限元模拟软件需要对模拟对象进行网格划分,以便后续模拟计算过程顺利进行。为了加快模拟仿真过程的计算速度,取管坯的 1/4 进行网格划分。为了避免模拟过程中,网格划分过大引起计算不收敛而导致模拟不能继续进行,对坯料进行不同量级的网格划分,如图 2 所示。

1.2 本构模型

根据前期对 Ti-B25 钛合金高温变形过程本构关系的研究^[8],本次挤压模拟过程采用的本构方程为:

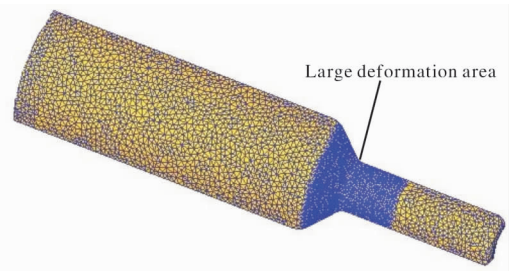


图 2 管坯的有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh of pipe blank

$$\dot{\varepsilon} = e^{18.98674} [\sinh(0.00844\sigma)]^{3.23212} \cdot \exp\left(\frac{-210594}{RT}\right)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为流动应力, MPa; R 为气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$; T 为热变形温度, K。

1.3 参数设置

通过 Ti-B25 钛合金热变形行为及热加工图的研究可知^[9]:在变形温度 $850 \sim 950 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、应变速率 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 的工艺参数范围内变形, Ti-B25 钛合金具有良好的动态再结晶组织。参照热加工图并结合实际生产条件,坯料的初始温度设为 $900 \text{ } ^\circ\text{C}$,应变速率设为 0.1 s^{-1} 。坯料与挤压模具之间的摩擦系数设为 0.3,导热系数设为 5。模拟过程的步长设为 0.5 mm,共模拟 600 步,每 2 步保存一次数据。

2 模拟结果与分析

图 3 为挤压过程中不同阶段 Ti-B25 钛合金管坯的应力场分布图。从图 3 可以看出,挤压开始阶段,受挤压杆的影响,大应力区域主要集中在管坯的头部和尾部,管坯中间部分应力较小。随着挤压的进行,管坯前端慢慢进入挤压筒并产生较大的变形,等效应力较大;而一旦管坯前端通过定径带,管坯

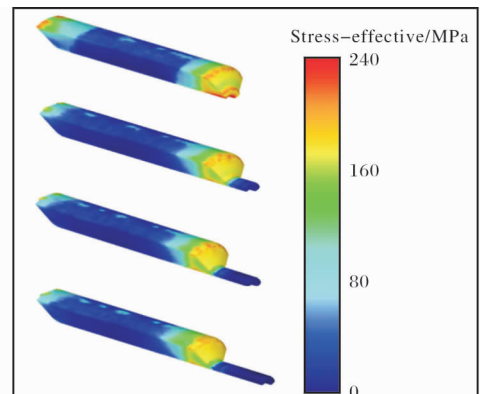


图 3 Ti-B25 钛合金管坯挤压过程中应力场分布

Fig. 3 Stress field distribution of Ti-B25 titanium alloy pipe blank during extrusion

应力集中得到释放, 等效应力就变得非常小。最大等效应力始终出现在挤压筒凹模圆角处。

图4为Ti-B25钛合金管坯挤压过程中不同阶段的应变场分布图。从图4可以看出, 挤压初期, Ti-B25钛合金管坯在挤压筒内的变形较小, 等效应变也很小。随着挤压进行, 管坯通过定径带, 在进入和通过定径带时都发生了很大的变形, 因此该处管坯表面的等效应变比较大。定径带圆角处管坯表面的等效应变最大, 其次是定径带内部坯料表面的等效应变, 而通过定径带的管坯表面等效应变相对较小。此外, 定径带圆角处管坯表面对应的等效应力也大。因此, 在实际Ti-B25钛合金管坯挤压过程中这一部位容易产生变形死区。

图5为Ti-B25钛合金管坯挤压过程中不同阶段的温度场分布图。从图5可以看出, 挤压初期阶段, Ti-B25钛合金管坯表面由于与挤压杆和挤压筒以及

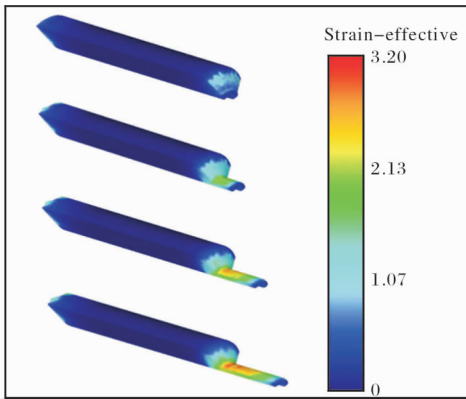


图4 Ti-B25钛合金管坯挤压过程中应变场分布

Fig. 4 Strain field distribution of Ti-B25 titanium alloy pipe blank during extrusion

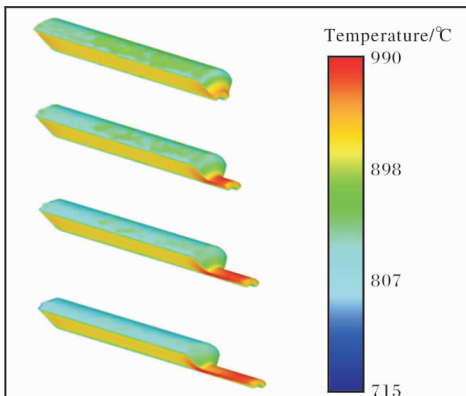


图5 管坯挤压过程中温度场分布

Fig. 5 Temperature field distribution of Ti-B25 titanium alloy pipe blank during extrusion

环境的热交换导致表面温度下降。随着挤压过程的进行, 与模具接触部位的管坯表面温度越来越低, 而进入和通过定径带的变形部位由于塑性变形功大部分转化为热能而导致定径带芯部处管坯温度越来越高, 使得管坯温度场分布严重不均匀。管坯内的最高温度与管坯表面的最低温度相差达到170℃。因此, 挤压时应该严格控制变形温度, 同时在综合考虑模具材料的选用范围和模具寿命的前提下, 尽可能提高模具温度, 以减少Ti-B25钛合金管坯表面温度的降低。

3 管材挤压试验

3.1 挤压管坯表面质量

通过DEFORM-3D软件对管材挤压过程的数值模拟, 在卧式油压机上进行了Ti-B25钛合金管坯的挤压试验。管坯挤压参数设置为: 变形温度900℃, 应变速率 0.1 s^{-1} , 挤压速度50 mm/s。挤压后的Ti-B25钛合金管坯尺寸为 $\phi 62\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 如图6所示。从图6可以看出, 在该工艺条件下挤压出来的Ti-B25钛合金管坯具有良好的直线度, 管坯表面光洁, 没有明显划痕及橘皮状褶皱。挤压管坯组织为变形的 β 相。挤压Ti-B25钛合金管坯前端有缺损、细小裂痕、褶皱, 主要是由于前端温度下降太快, 并且挤压前期端部变形不稳定造成, 是管坯挤压过程中的普遍现象。



图6 Ti-B25钛合金挤压管坯

Fig. 6 Extruded pipe blank of Ti-B25 titanium alloy

3.2 挤压管坯室温力学性能

Ti-B25属于高强 β 钛合金, 具有优异的固溶时效强化效应。为了调整Ti-B25钛合金管坯的力学性能, 获得良好的强-塑性匹配, 对挤压管坯进行了2种不同工艺的热处理, 分别为: ① 830℃/1 h固溶处理; ② 830℃/1 h + 600℃/8 h固溶时效处理。Ti-B25钛合金管坯原始显微组织和热处理后的显微组织如图7

所示。从图 7a 可以看出, 原始管坯显微组织中主要为挤压变形的 β 晶粒, 并且伴随有少量细小的再结晶晶粒。从图 7b 可以看出, 管坯经过 830 °C/1 h 固溶

处理后, 大量 α 相在 β 基体上析出, 呈不均匀分布。从图 7c 可以看出, 管坯经过 830 °C/1 h + 600 °C/8 h 固溶时效处理后, α 相在 β 基体上弥散分布。

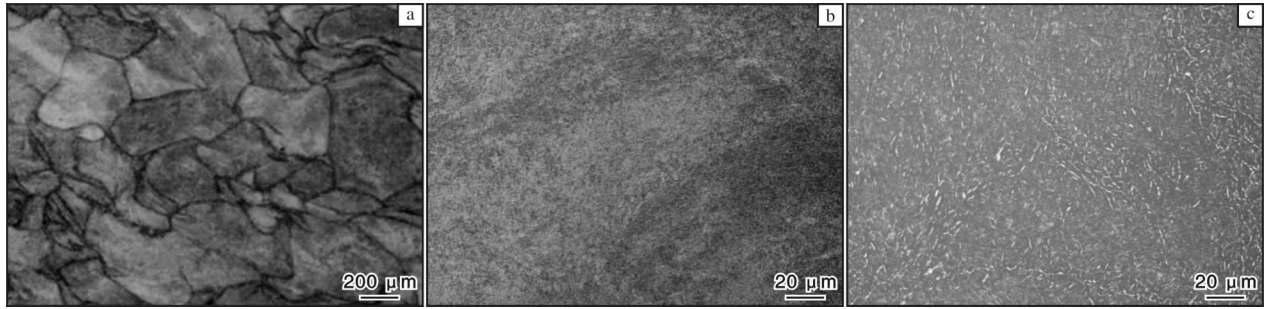


图 7 Ti-B25 钛合金管坯不同状态的显微组织

Fig. 7 Microstructures of Ti-B25 titanium alloy pipe blank at different states: (a) original state; (b) 830 °C/1 h solution treatment; (c) 830 °C/1 h + 600 °C/8 h solution aging treatment

对 3 种状态的 Ti-B25 钛合金管坯进行室温拉伸性能测试, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 830 °C/1 h 固溶处理使管坯的抗拉强度和屈服强度降低, 断后伸长率和断面收缩率明显提高。与固溶热处理相比, 830 °C/1 h + 600 °C/8 h 固溶时效处理提高了管坯的强度, 降低了管坯的塑性。与原始管坯相比, 经过 830 °C/1 h + 600 °C/8 h 固溶时效处理后管坯强度得到了明显的提高, 抗拉强度达到 1239 MPa, 屈服强度达到 1152 MPa, 断后伸长率也略有提高, 达到 10%。经固溶时效热处理后的 Ti-B25 钛合金管坯, 力学性能满足舰船天线管使用要求。

表 1 Ti-B25 钛合金管坯不同状态的室温力学性能

Table 1 Room temperature mechanical properties of Ti-B25 titanium alloy pipe blank in different states

Pipe state	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%
Original state	1004	1059	9.0	24
830 °C/1 h	863	889	19.5	57
830 °C/1 h + 600 °C/8 h	1152	1239	10.0	21

图 8 为固溶时效后 Ti-B25 钛合金管坯的室温拉伸断口形貌。从图 8a 可以看出, 断口主要由中部的纤维区和周围的剪切唇区组成, 两者之间有明显的界限, 纤维区范围较大。从图 8b 可以看出, 剪切唇区分布着一定数量的等轴状韧窝, 韧窝尺寸小。这些特征表明 Ti-B25 钛合金管坯断裂方式为韧性断裂, 管坯经过固溶时效后具有良好的强-塑性匹配。

3.3 管材成品

900 °C、0.1 s⁻¹ 工艺条件下挤压的 Ti-B25 钛合

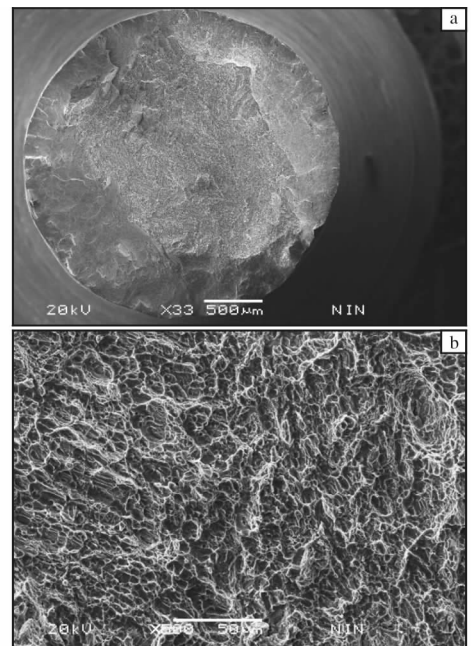


图 8 Ti-B25 钛合金管坯室温拉伸断口形貌

Fig. 8 Room temperature tensile fracture morphologies of Ti-B25 titanium alloy pipe blank: (a) macro-morphology; (b) micro-morphology

金管坯, 经过 830 °C/1 h + 600 °C/8 h 固溶时效处理后进行机械加工, 成功得到 $\phi 55$ mm \times 5 mm \times 2700 mm 的无缝管材。

4 结 论

(1) 在 Ti-B25 钛合金管材挤压有限元模拟过程中, 挤压筒凹模圆角处管坯等效应力最大, 定径带圆角处管坯等效应变最大, 定径带芯部管坯温升最严重。

(2) 在温度 900 ℃、应变速率 0.1 s^{-1} 工艺参数下进行 Ti-B25 钛合金管材挤压, 获得了表面质量良好的挤压管坯。管坯微观组织为变形的 β 相, 并伴有再结晶晶粒。

(3) 挤压 Ti-B25 钛合金管坯经过 830 ℃/1 h + 600 ℃/8 h 固溶时效处理, α 相在 β 基体上弥散分布。管坯屈服强度达到 1152 MPa, 抗拉强度达到 1239 MPa, 断后伸长率达到 10%。断口形貌呈现韧性断裂, Ti-B25 钛合金管坯获得了良好的强-塑性匹配。

(4) 对固溶时效处理后的 Ti-B25 钛合金管坯进行机械加工, 成功得到 $\phi 55 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2700 \text{ mm}$ 的无缝管材。

参考文献 References

[1] 黄晓艳, 刘波, 李雪. 钛合金在舰船上的应用[J]. 南方金属, 2005(6): 10-11.

[2] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 538-544.

[3] 赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 398-404.

[4] 王文杰. 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 98-105.

[5] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8-12.

[6] 田非, 杨雄辉. 舰艇用钛合金技术应用分析[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(3): 77-80.

[7] 周佳宇, 哈军. 钛合金材料在舰船管系上的应用[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(3): 40-42.

[8] 谭伟力, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 高强 β 钛合金高温变形过程本构关系的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2018, 46(6): 57-62.

[9] 谭伟力, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 钛合金热变形行为及加工图[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(1): 36-42.

2020 年中国钛、锆产品进出口统计

项 目	进口数量/kg	进口金额/美元	出口数量/kg	出口金额/美元
钛相关产品				
钛矿砂及其精矿	3 014 397 402	642 983 173	12 215 013	15 124 074
钛的氧化物	8 441 331	34 862 765	48 782 148	84 833 686
钛白粉	168 288 740	478 624 958	728 298 685	1 355 528 574
海绵钛	4 722 585	36 252 267	204 960	1 056 293
其他未锻轧钛	835 987	16 442 560	123 990	1 713 782
钛粉末	276 717	4 176 273	53 577	1 382 953
钛条、杆、型材及异型材	1 266 488	66 815 463	4 890 832	101 487 578
钛丝	218 883	19 554 594	549 759	17 584 327
厚度 $\leq 0.8\text{mm}$ 的钛板、片、带、箔	2 252 342	42 185 491	255 302	8 221 085
厚度 $> 0.8\text{mm}$ 的钛板、片、带、箔	1 153 014	62 894 543	4 813 555	130 468 642
钛管	697 309	20 344 249	2 337 257	61 921 743
其他锻轧钛及钛制品	551 605	242 059 128	2 399 554	98 981 196
锆相关产品				
锆矿砂及其精矿	1 082 157 969	869 218 961	17 123 947	69 158 427
锆的氯化物及氢氧基氯化物	14 716	1 087 100	38 469 284	416 858 944
碳酸锆	—	—	17 925 059	224 590 272
未锻轧锆及粉末	148 138	1 777 052	237 689	21 930 122
锻轧锆及锆制品	256 262	20 587 337	48 961	27 052 889