

钛合金管材热挤压过程模拟

李倩*, 罗登超, 任伟宁, 谢英杰, 李维, 负鹏飞

西部钛业有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月5日; 录用日期: 2025年10月15日; 发布日期: 2025年10月29日

摘要

本文使用有限元软件模拟TC4管材热挤压过程。通过建立合适的有限元模型, 研究了坯料初始温度为850℃、900℃、950℃和1000℃时, 热挤压过程中挤压力、等效应力、等效应变及管材温度的变化规律, 可以得出以下结论: (1) TC4管坯初始预热温度升高使得金属发生热软化, 导致挤压力降低; 随着预热温度的升高, 挤压筒内的坯料应力逐渐减小, 管材的变形更加均匀, 但头部仍然存在挤压小变形区; (2) 出模口管材的温度由内向外呈现先升高后降低的趋势, 坯料预热温度从850℃升高至1000℃时, 稳态挤压出模口温升分别为93℃、64℃、40℃和16℃, 挤压末期出模口管材的温降分别为10℃、40℃、66℃、104℃; (3) TC4坯料初始温度为950℃时, 挤压力适中, 管材挤压变形均匀, 仅在管材尾部存在少量应变集中。在TC4坯料初始预热温度为950℃热挤压实验中, 挤压后的组织和性能均满足使用要求, 且沿壁厚方向的组织与温度变化有关, 进而验证了模拟结果。

关键词

热挤压, TC4管材, 挤压力, 有限元模拟

Simulation of the Hot Extrusion Process of Titanium Alloy Tube

Qian Li*, Dengchao Luo, Weining Ren, Yingjie Xie, Wei Li, Pengfei Yun

Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: September 5, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

In this paper, finite element software is used to simulate the hot extrusion process of TC4 pipe. By establishing an appropriate finite element model, the variation of extrusion pressure, equivalent stress, equivalent strain and pipe temperature during hot extrusion were studied when the initial

*通讯作者。

文章引用: 李倩, 罗登超, 任伟宁, 谢英杰, 李维, 负鹏飞. 钛合金管材热挤压过程模拟[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1943-1954. DOI: 10.12677/ms.2025.1510207

billet temperature was 850°C, 900°C, 950°C and 1000°C. The following conclusions can be drawn: (1) The increase of initial preheating temperature of TC4 tube billet makes the metal thermal softening and leads to the decrease of extrusion pressure; with the increase of preheating temperature, the billet stress in the extrusion cylinder decreases gradually, and the deformation of the pipe becomes more uniform, but there is still a small deformation zone at the head. (2) The temperature of die outlet pipe increased first and then decreased from inside to outside. When the billet preheating temperature increased from 850°C to 1000°C, the temperature rise of steady-state extrusion die outlet was 93°C, 64°C, 40°C and 16°C respectively, and the temperature drop of die outlet pipe at the end of extrusion was 10°C, 40°C, 66°C and 104°C respectively. (3) When the initial temperature of TC4 billet is 950°C, the extrusion pressure is moderate, the extrusion deformation of the pipe is uniform, and only a small amount of strain concentration exists at the end of the pipe. In the hot extrusion experiment with the initial preheating temperature of TC4 billet at 950°C, the microstructure and properties after extrusion meet the application requirements, and the microstructure along the wall thickness direction is related to the temperature change, thus verifying that the simulation results are correct.

Keywords

Hot Extrusion, TC4 Pipe, Extrusion Force, Finite Element Modelling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钛合金由于其具有优异的比强度、耐蚀性、耐高温性和抗疲劳性，成为工业装备中的优选结构材料[1][2]。钛合金管材可以作为工业装备中输送气体、液体及带固体颗粒流体的关键构建[3]。应用于航空航天[4]、舰船、核电、汽车[5]、石油[6]等相关领域。其常用的成形方法有轧制、挤压、拉拔、焊接等。挤压成形中管坯在三向压应力状态下成形，材料变形程度相较于其他成形方法更大，有利于细化晶粒，得到组织和性能的优异管坯。管材挤压成形技术的分类方法有很多，从坯料加热温度分类可分为冷挤压、温挤压和热挤压[7][8]。热挤压是金属材料被加热至再结晶温度之上进行的挤压成形技术。热挤压时流动应力约为冷挤压时的 1/5，塑性变形能力约为冷挤压的 6 倍。重要的是采用热挤压成形还具有材料流动性好、设备费用低等优点。因此，热挤压成形有利于复杂形状型材的挤压。但实际挤压过程属于多参数耦合作用下的复杂成形过程，众多挤压参数(坯料初始温度、挤压速度、挤压比、摩擦等)都会对成形过程造成影响。孙花梅[9]等人通过数值模拟及实验研究了 Ti-B25 钛合金管材的挤压工艺，结果表明在变形温度 900°C、应变速率 0.1 s^{-1} 条件下可成功挤压出满足要求的管坯。张永强[10]等人通过试验的方式研究了不同挤压温度、挤压比和挤压速度等参数对 TC4 合金管材挤压成型工艺的影响，以及润滑方式对 TC4 合金挤压管材表面的影响，从而获得最优挤压工艺。张大伟[11]等人采用热挤压实验方法研究了化学成分、挤压比(变形程度)、挤压温度、退火温度对 TC2 钛合金管材挤压成形、组织性能的影响，确定了合理的工艺路线及参数。

为了探究挤压温度对热挤压过程的影响，本文通过有限元模拟软件对 TC4 钛合金管材的热挤压过程进行有限元模拟，研究当挤压温度分别 850°C、900°C、950°C 和 1000°C 时挤压力、坯料等效应力、等效应变和温度的变化规律。在获得合理的挤压温度后，将直径为 $\varnothing 178 \text{ mm}$ ，中心带钻孔的管坯棒，在 2500T 卧式挤压机上挤压至外径为 $\varnothing 75 \text{ mm}$ ，厚度为 20 mm 的管材，进而验证模拟结果。

2. 挤压模型的建立及参数的选择

2.1. 几何模型及网格划分

管材热挤压过程满足几何模型对称、边界条件对称、载荷对称三个条件，可以将模型简化为二维进行模拟。**图 1** 为 TC4 钛合金管坯热挤压几何模型。变形过程采用弹塑性有限元法，由于变形过程中存在模具、凹模、挤压针等与管坯之间的热交换以及摩擦生热等过程，所以采用热力耦合的分析方法。整个挤压过程在几何上是对称的，故将模型处理为轴对称模型，并且将穿孔针和挤压垫、凹模和模具分别处理为一个具有传热性质的刚性体。不考虑其塑性变形，网格单元类型选择 CAX4RT，利用质量缩放技术来提升计算效率。简化后的有限元模型如**图 1** 所示。

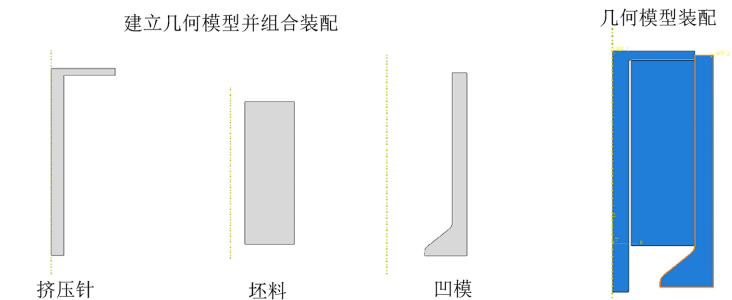


Figure 1. Geometric model of TC4 pipe for hot extrusion
图 1. TC4 管材热挤压的几何模型

2.2. 材料模型

钛合金热挤压有限元模型中的材料模型主要包括(1) 材料的本构模型，即材料在不同温度下的应力 - 应变关系，如**图 2** 所示，泊松比为 0.31；(2) 材料的热物理性能，包括材料的热导率、比热容等如**表 1** 所示。

Table 1. Thermal conductivity and specific heat capacity of TC4 titanium alloy at different temperatures [10]
表 1. TC4 钛合金不同温度的热导率和比热容[10]

温度/℃	20	100	200	300	400	500
热导率/[W (m×℃)]	6.8	7.4	8.7	9.8	10.3	11.8
比热容/[J (kg×℃)]	611	624	653	674	691	703

2.3. 边界条件及载荷

在挤压过程中为防止高温坯料有过大的降温，同时也防止模具过大的升温，将挤压速度设定为 50 mm/s，如**图 3**，模具的预热温度设定为 300℃。将凹模在位移上设定为全约束。坯料的初始温度设定为 850℃、900℃、950℃和 1000℃。

3. 模拟结果与讨论

3.1. 挤压温度对挤压力的影响

图 4 为模拟所得不同坯料初始温度下的挤压力随时间的变化曲线，从整体曲线可以看出管坯初始温度升高会导致挤压力降低。这是由于坯料预热温度从 850℃升高至 1000℃造成金属热软化，材料变形抗力减小使得初始温度升高时挤压力整体较小。挤压初始阶段即 A 区域中，随着管坯初始温度的升高，挤

压力上升的斜率逐渐减小,当管坯初始温度为 850℃、900℃、950℃和 1000℃时,此斜率分别为 367682.7 N/mm、256674.5 N/mm、213657.8 N/mm、159421.5 N/mm。稳定挤压阶段即 B 区域中,随着挤压的进行,四种管坯初始温度的挤压力均逐渐增大,且管坯初始温度为 1000℃时,挤压力的增大最为明显。挤压末期即 C 区域中,挤压力呈现出快速上升趋势,并达到最大值。挤压力的逐渐增大主要是因为挤压过程中存在温降,且越靠近挤压末期,温降越大。

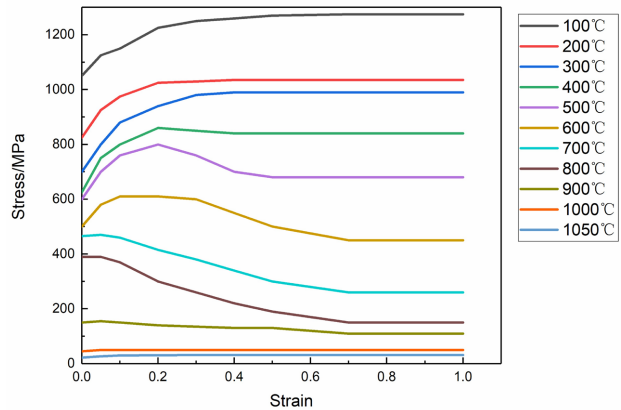


Figure 2. Plastic stress-strain curves of TC4 titanium alloy at different temperatures
图 2. 不同温度的 TC4 钛合金塑性应力 - 应变曲线

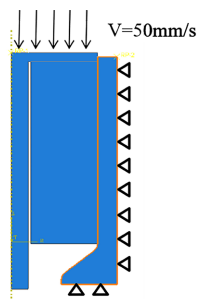


Figure 3. Load and displacement boundary conditions of the finite element model of hot extrusion
图 3. 热挤压有限元模型的载荷及位移边界条件

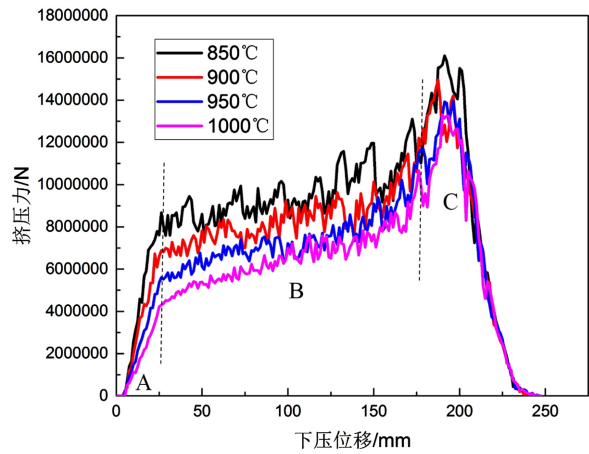


Figure 4. Effect of initial billet temperature on extrusion pressure
图 4. 坯料初始温度对挤压力的影响

3.2. 挤压温度对等效应力的影响

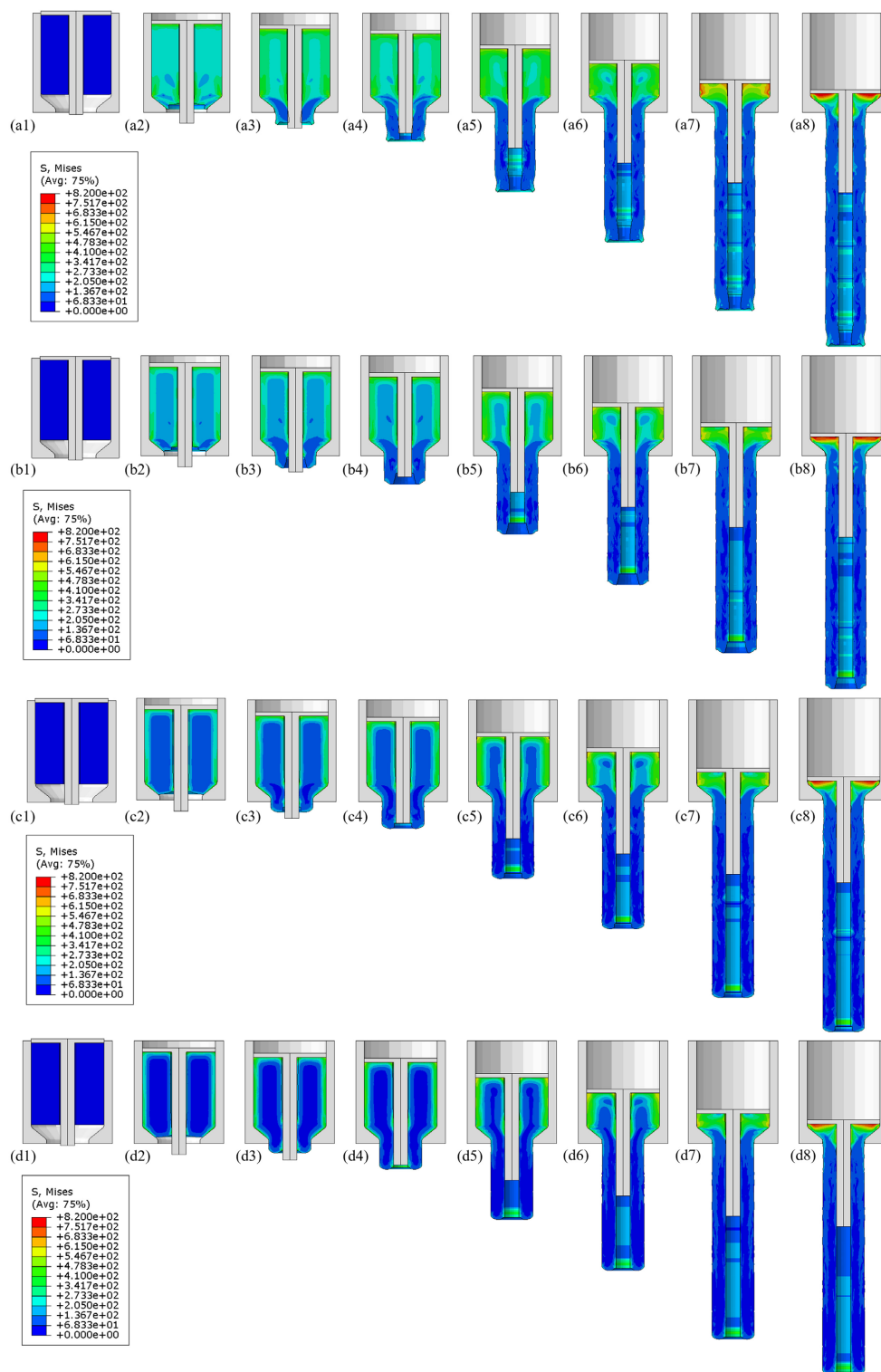


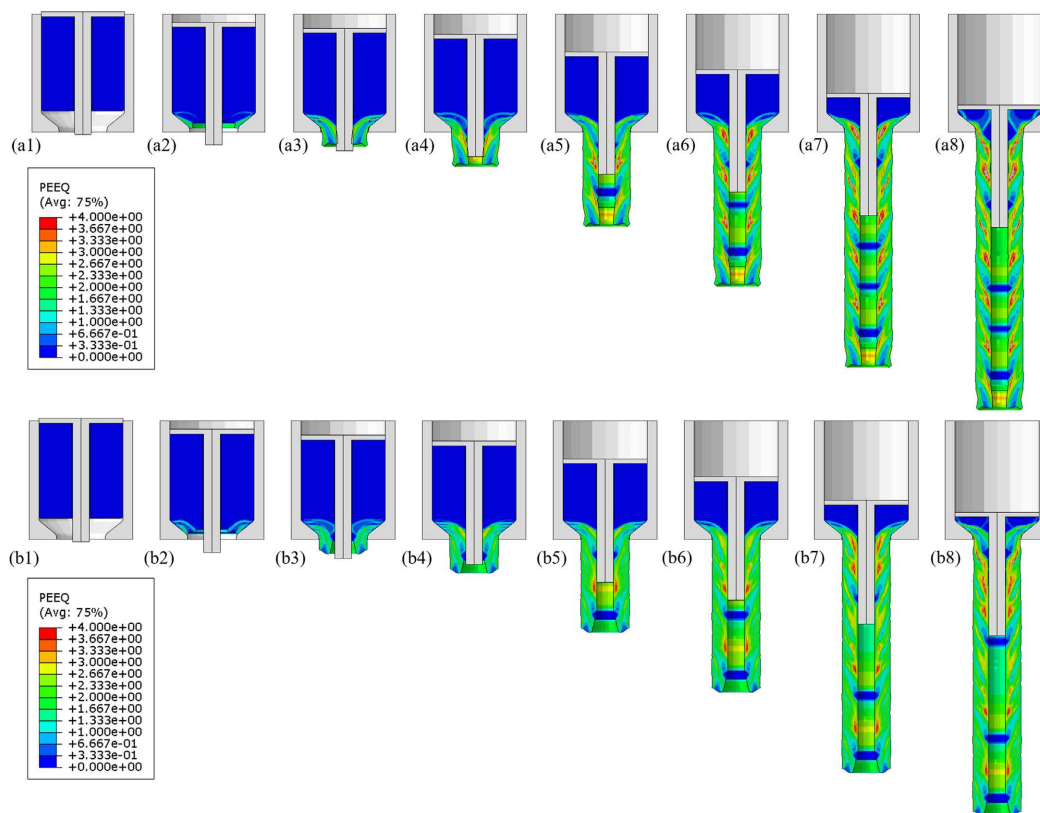
Figure 5. Medium effect force cloud diagram during extrusion process, initial temperature of tube billet is: (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C and (d) 1000°C

图 5. 挤压过程中等效应力云图，管坯初始温度分别为：(a) 850°C、(b) 900°C、(c) 950°C、(d) 1000°C

图 5 显示了管坯预热温度 850℃、900℃、950℃ 和 1000℃ 时, 挤压过程中等效应力云图的变化。从图 5(a3)、图 5(b3)、图 5(c3) 和图 5(d3) 中可以看出, 挤压时坯料进入凹模口前, 即在挤压筒中的坯料存在较大应力, 随着预热温度的升高, 挤压筒内的坯料应力逐渐减小。坯料与挤压模具接触部分存在摩擦力, 导致坯料内外表面存在一定的应力, 且应力随坯料预热温度的变化趋势并不明显。在挤压模口的部位, 管坯应力较小。从挤压末期图 5(a7)、图 5(a7)、图 5(c7) 和图 5(d7) 的对比中可以发现, 挤压筒中的坯料应力均存在明显增大的现象, 且预热温度为 850℃ 时, 在管坯与挤压筒的接触部位存在较大应力集中。

3.3. 挤压温度对等效应变的影响

图 6 显示了不同管坯预热温度下, 管材的等效应变分布图。从图中可以看出, 坯料在出模口时均存在较大应变, 且挤压后的管材头部均存在挤压小变形区。随着管坯初始温度的升高, 管材的等效应变分布更加均匀。当预热温度为 850℃ 时, 挤压后管材的应变集中区域较多, 且从挤压开始直至挤压结束, 存在应力集中区域; 当预热温度为 1000℃ 时, 仅在挤压过程接近尾声时, 出现少量应变集中。其原因是管坯温度的升高能够降低材料的变形抗力, 减小了坯料和模具之间的摩擦力, 降低了挤压针和凹模对管坯内外层金属流动的阻碍作用, 所以升高管坯初始温度有利于提高管材变形均匀性, 但是挤压过程均存在不同程度的温降现象, 导致了挤压后期坯料变形抗力的不均匀增大, 从而出现管材变形不均匀。当预热温度为 850℃ 时, 管材头部呈现不规则变形, 随着坯料预热温度的升高, 挤压后的管材头部小变形区域扩大, 形状逐渐变得规则, 如图 6(d8) 的喇叭口形。这是由于管坯前段外壁金属首先与挤压模具接触产生变形, 并且随着挤压继续进行, 材料的变形由外壁逐渐向管材内部扩展。坯料头部金属突破模口后, 由于模口处对金属的阻力大于挤压针对金属的阻力, 管坯外壁的金属流动速度小于内壁的金属, 所以管坯头部的纵向金属网格线呈向外的喇叭口型。



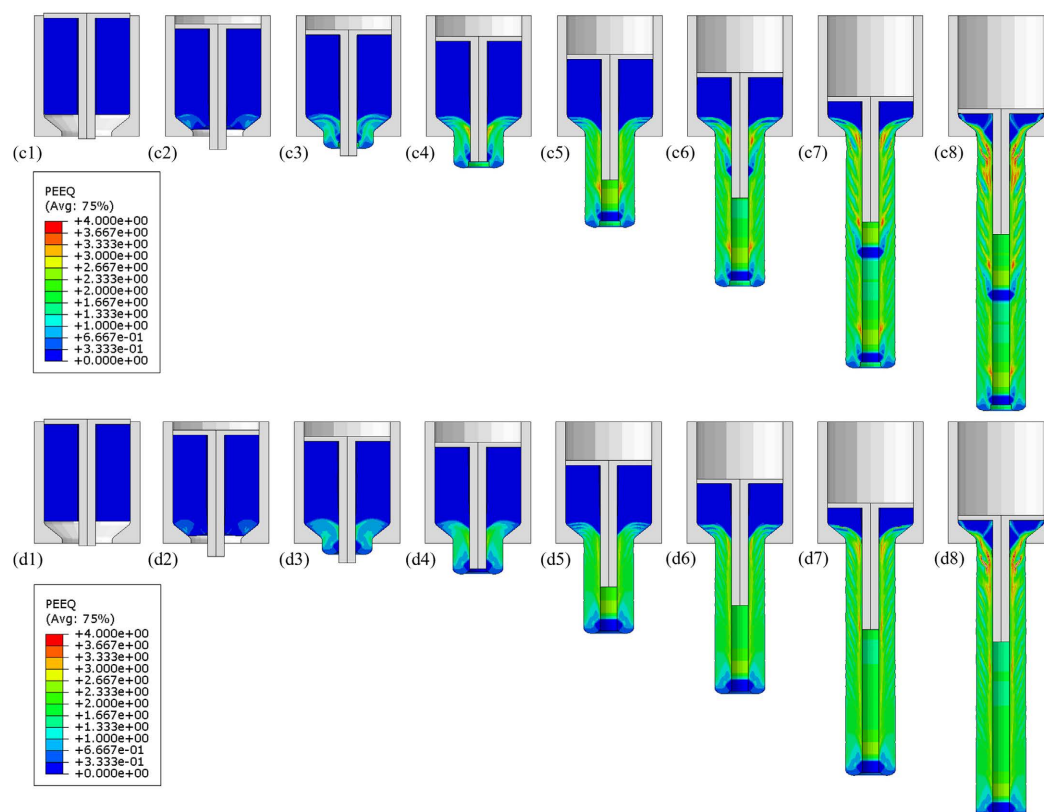


Figure 6. Medium effect cloud variation during extrusion process, initial temperature of tube billet is: (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C and (d) 1000°C

图 6. 挤压过程中等效应变云图, 管坯初始温度分别为: (a) 850°C、(b) 900°C、(c) 950°C、(d) 1000°C

3.4. 挤压过程中的温度变化

在管材热挤压过程中, 出模口的坯料温度对管材组织的均匀性有很大影响。然而, 在热挤压过程中存在复杂的热效应: ① 坯料与模具的摩擦生热、② 金属变形生热、③ 热传导及热辐射。为了获得挤压过程中坯料和模具的温度变化, 选取了不同预热温度下挤压初始阶段和稳态挤压阶段的温度分布云图, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 由于变形生热出模口处均存在一定的温升, 挤压筒内坯料与模具的接触部位存在温降, 这是由于坯料向模具传递的热量大于摩擦生成的热量所导致的。

为了研究出模口处温度的变化, 将稳态挤压阶段的出模口温度进行统计, 如图 8 所示。从图中可以看出, 出模口管材的温度由内向外呈现先升高后降低的趋势, 这是变形热和热损失共同作用的结果。因为挤压过程中管材内外表面与模具接触, 模具初始预热温度为 300°C, 且凹模和挤压针均存在面向空气的热辐射, 即热量从坯料传至模具、再从模具传至空气, 管材内外表面热量损失远大于变形生热, 致使管材内外表面出现温降; 反之, 出模口管材厚度的 1/2 处的变形生热大于热损失, 导致温升。随着坯料预热温度的升高, 出模口管材的温升逐渐减小, 即预热温度从 850°C 升高至 1000°C 时, 稳态挤压出模口温升分别为 93°C、64°C、40°C 和 16°C。同时, 坯料初始温度对出模口管材横截面的温度均匀性存在影响, 图 8 中管材最高温度与最低温度的差值分别为 266°C、282°C、304°C 和 308°C。这是因为在坯料初始温度升高、模具温度不变的情况下, 坯料与模具之间的温度差增大, 单位时间内从坯料传至模具的热量增加, 使得预热温度 1000°C 时, 凹模口处坯料的温降最大, 进而影响管材横截面的温度均匀性。

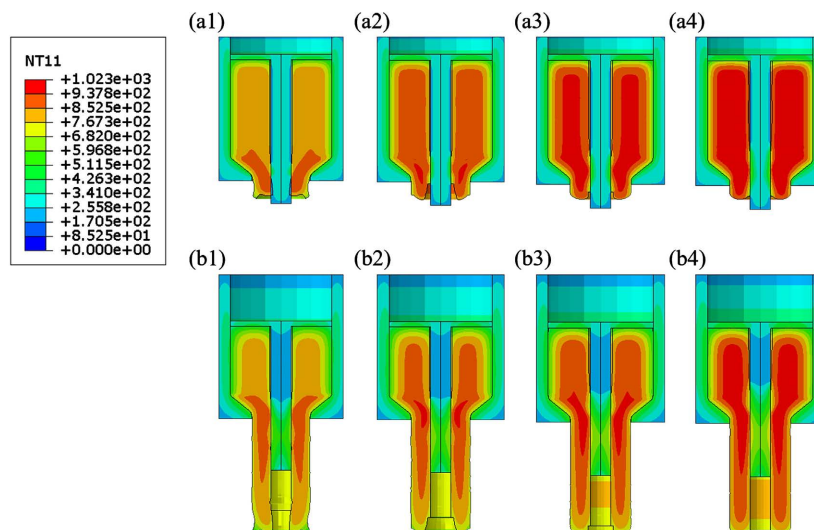


Figure 7. Temperature cloud map in the extrusion process: (a) is the initial extrusion stage, and the initial temperatures of the billet are: (a1) 850°C, (a2) 900°C, (a3) 950°C, (a4) 1000°C; (b) is the steady-state extrusion stage, and the initial temperatures of the billet are: (b1) 850°C, (b2) 900°C, (b3) 950°C, (b4) 1000°C

图 7. 挤压过程中的温度云图, (a)为挤压初始阶段, 坯料初始温度分别为: (a1) 850°C、(a2) 900°C、(a3) 950°C、(a4) 1000°C, (b) 为稳态挤压阶段, 坯料初始温度分别为: (b1) 850°C、(b2) 900°C、(b3) 950°C、(b4) 1000°C

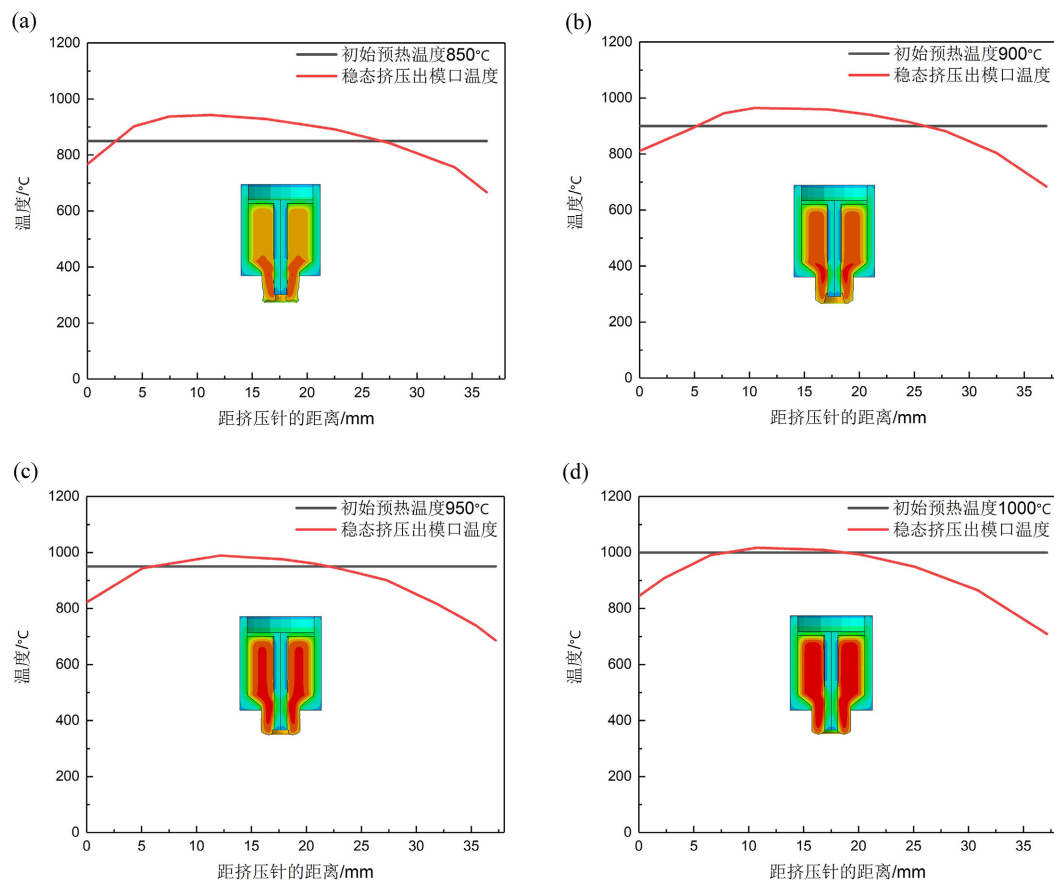


Figure 8. Temperature changes at die outlet during steady-state extrusion stage: (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C

图 8. 稳态挤压阶段出模口温度变化: (a) 850°C、(b) 900°C、(c) 950°C、(d) 1000°C

图9 分别为坯料初始温度不同时, 挤压末期的出模口管材温度。从图中可以看出, 在管材挤压末期, 坯料温度均低于预热温度, 而且坯料预热温度越高, 挤压末期温降越大。当预热温度从 850℃ 升高至 1000℃ 时, 挤压末期出模口管材的温降分别为 10℃、40℃、66℃、104℃, 这也是造成挤压后期加压力迅速增大的原因。随着温度的增大, 材料变形抗力逐渐增加, 在挤压末期坯料预热温度 1000℃ 的挤压力斜率最大。

上文对坯料初始温度为 850℃、900℃、950℃ 和 1000℃ 的 TC4 管材进行热挤压模拟, 从挤压力、等效应力、等效应变、温度四方面进行分析可得, 坯料初始温度为 850℃ 的挤压过程挤压力最大, 且挤压后管材整体应变不均匀, 应变集中区域最多, 头部形状不规则; 坯料初始温度为 900℃ 时, 管材依旧存在变形不均匀的现象, 但相较于坯料初始温度为 850℃, 应变集中区域明显减少; 坯料初始温度为 1000℃ 时, 挤压力最小, 挤压过程管材变形均匀, 但管材横截面温度均匀性差, 可能会导致管材内外表面出现裂纹等缺陷; 坯料初始温度为 950℃ 时, 挤压力适中, 管材挤压变形均匀, 仅在管材尾部存在少量应变集中。因此, 本文的热挤压实验中将 TC4 坯料的加热温度定位 950℃。相较于其它已发表的试验型文献数据, 本文通过有限元模拟进而获得挤压力、局部温升等参数, 可以准确推算最佳挤压温度, 减少实际生产的试错成本。该模型也可应用于其他钛合金牌号挤压温度的探索。

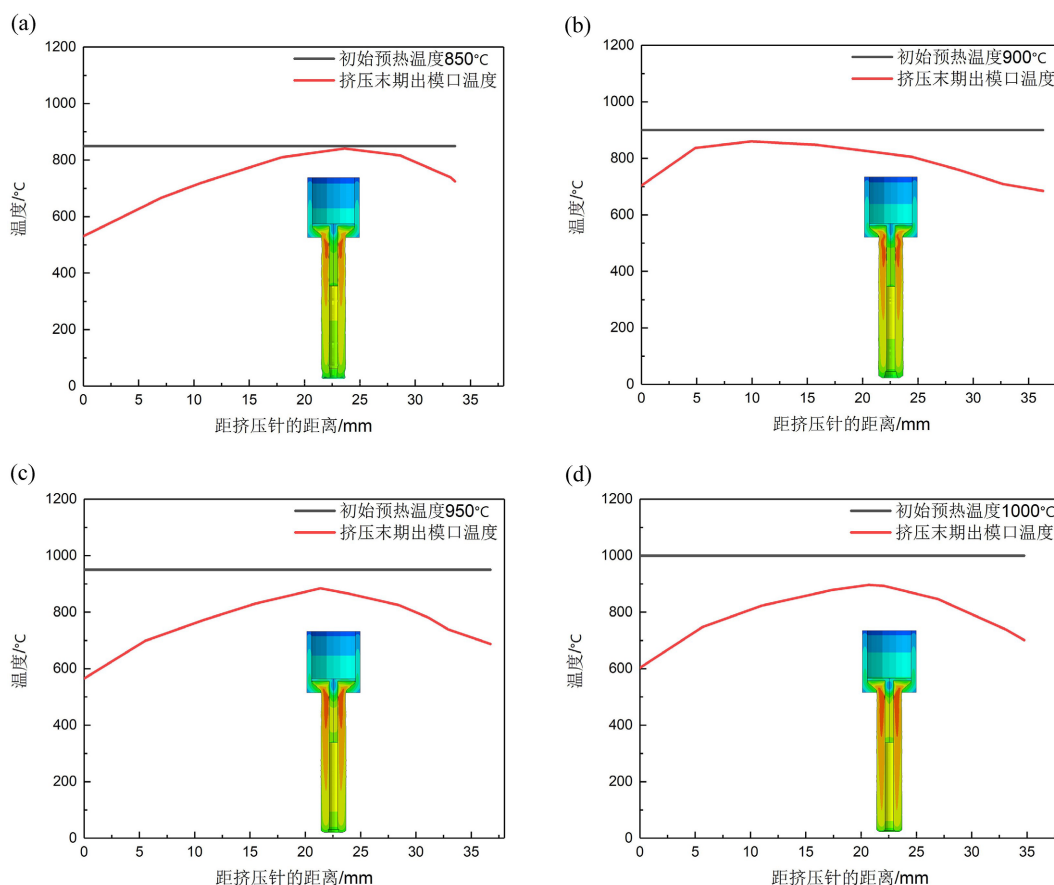


Figure 9. Temperature changes at die outlet at the end of extrusion: (a) 850℃, (b) 900℃, (c) 950℃, (d) 1000℃
图9. 挤压末期出模口温度变化: (a) 850℃、(b) 900℃、(c) 950℃、(d) 1000℃

4. 实验结果

本文使用的 TC4 坯料经过三次真空自耗熔炼、两次 β 区锻造及多次两相区锻造, 其化学成分符合

GB/T 3620.1-2016 如表 2 所示, β 转变温度为 1007℃。图 10 为 TC4 坯料的显微组织, 从图中可以看出, 坯料为两相区加工的均匀组织, 无原始 β 晶界及魏氏组织, 其中主要包括等轴 α 相及 β 转变相。

采用箱式电阻炉对 TC4 坯料进行加热, 加热温度 950℃、保温时间为 150 min。挤压设备为 2500 T 卧式挤压机, 挤压速度设为 50 mm/s。挤压前 TC4 坯料规格为 $\Phi 178 \times \Phi 41.5 \times L$ mm, 挤压后规格为 $\Phi 75 \times 20$ mm, 挤压模口规格为 $\Phi 75.5 \sim \Phi 76.5$ mm, 挤压针直径为 $\Phi 34 \sim 35$ mm。为了降低挤压过程中的摩擦力, 同时防止坯料的氧化, 对 TC4 坯料进行内钢外铜双包套包覆。挤压后的管材质量良好。

Table 2. Chemical compositions of TC4 titanium alloy (% mass fraction)

表 2. TC4 钛合金化学成分(%质量分数)

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
基体	6.36	4.09	0.150	0.006	0.008	<0.0006	0.15
	6.39	4.06	0.148	0.005	0.008		0.15
	6.34	4.07	0.149	0.005	0.007		0.16

Table 3. Mechanical properties of TC4 tube at room temperature before and after extrusion

表 3. TC4 管材挤压前后的室温力学性能

	牌号	抗拉/MPa	屈服/MPa	延伸/%	断面收缩/%
挤压前	TC4	922	834	13	43
		913	823	15	38
挤压后		967	876	17.5	48
		967	873	19	47

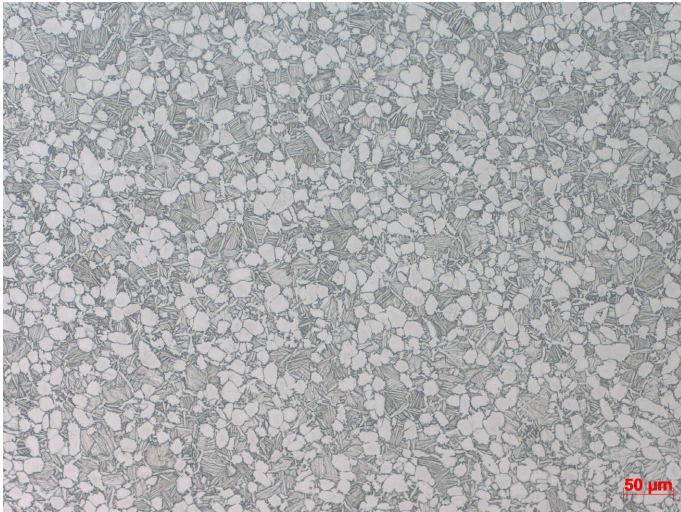


Figure 10. Microstructure of TC4 bar before extrusion

图 10. 挤压前 TC4 棒料的显微组织

TC4 管材在热挤压后, 其组织与冷却速度有密切关系, 变形的组织可以分为变形影响下的组织和变形后冷却结果产生的组织。图 11 为热挤压冷却后沿厚度方向不同位置的横纵向显微组织, 从图中可以看出, 挤压后组织存在明显细化, 原始组织中的初生 α 相和片层 α 相均参与变形。初生 α 相在内、外表面纵横向存在明显差异, 纵向组织中的初生 α 相呈现出沿挤压方向的条状; 厚度 1/2 处的纵横向组织中 α 相呈等轴状, 纵向中有少量条状 α 。在挤压过程中棒坯的等轴 α 相沿金属流动方向被拉长为条状 α 相,

由于内外表面冷速大，条状 α 相没有过多热量进行动态回复再结晶，被保留在管材边部的组织内，依旧呈现热挤压过程中的形状；沿厚度方向的中间部位冷却速度小，挤压后的余热可为条状 α 相的动态回复再结晶提供能量，故呈等轴状。

内表面及厚度 1/2 处的组织中存在次生的片层 α ，且片层 α 尺寸差异明显。厚度 1/2 处的片层 α 呈一定的集束，集束尺寸和片层厚度均大于内表面片层 α 。结合模拟结果，在出模口管材厚度的 1/2 处的变形生热大于热损失，即管材厚度 1/2 处的挤压温升最大，温度可达 990°C 与相变点仅相差 17°C ，这导致管材局部区域出现 β 相。冷却过程中， β 相转变为片层 α 集束，且片层 α 存在粗化现象。从图 11(c) 中可以看出，管材外表面组织中不存在片层 α ，而是片层 α 经变形后出现再结晶，进而球化后的细小等轴 α 。

通过电子万能试验机对挤压前后的热加工态棒坯及挤压后的管材分别进行拉伸试验，结果如表 3 所示。从结果可以看出，挤压后的塑韧性均存在明显提升，这与挤压后管材组织细化有关。挤压后的组织和性能均满足使用要求。

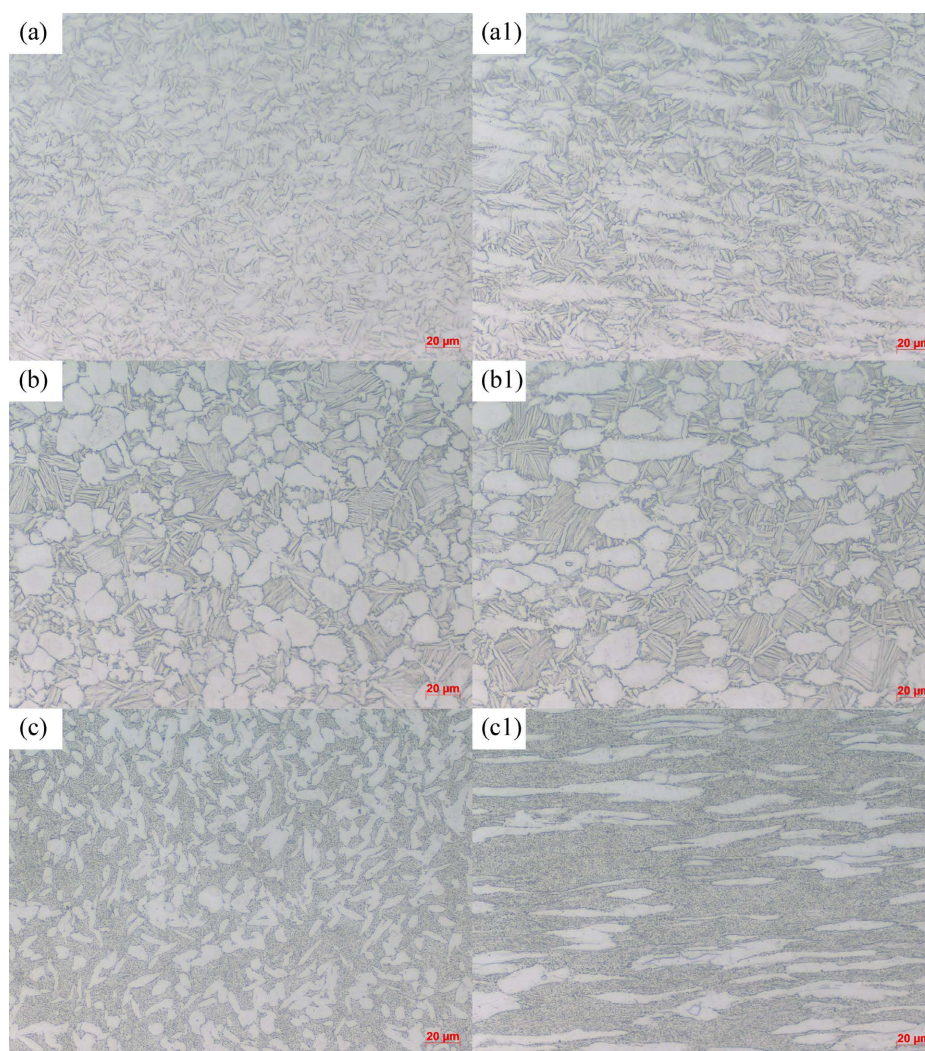


Figure 11. Longitudinal and transverse microstructure of TC4 pipe after extrusion: (a) transverse structure of inner surface, (a1) longitudinal structure of inner surface, (b) transverse structure at 1/2 thickness, (b1) Longitudinal at 1/2 thickness, (c) transverse surface, (c1) longitudinal surface
图 11. TC4 管材挤压后的纵横向组织: (a) 内表面横向、(a1) 内表面纵向、(b) 厚度 1/2 处横向、(b1) 厚度 1/2 处纵向、(c) 外表面横向、(c1) 外表面纵向

5. 结论

(1) TC4 管坯初始预热温度升高使得金属发生热软化, 导致挤压力降低; 随着预热温度的升高, 挤压筒内的坯料应力逐渐减小, 管材的变形更加均匀, 但头部仍然存在挤压小变形区; 且挤压过程中管材头部的纵向金属网格线呈向外的喇叭口型。

(2) 出模口管材的温度由内向外呈现先升高后降低的趋势, 坯料预热温度从 850℃ 升高至 1000℃ 时, 稳态挤压出模口温升分别为 93℃、64℃、40℃ 和 16℃, 挤压末期出模口管材的温降分别为 10℃、40℃、66℃、104℃。

(3) 坯料初始温度为 950℃ 时, 挤压力适中, 管材挤压变形均匀, 仅在管材尾部存在少量应变集中; TC4 坯料初始预热温度为 950℃ 热挤压实验中, 挤压后的组织和性能均满足使用要求, 且沿壁厚方向的组织与温度变化有关, 进而验证模拟结果是正确的。

基金项目

“先进结构与复合材料”重点专项“钛合金返回料利用及板管材高效短流程制备关键技术开发”项目(项目编号: 2022YFB3705600)中子课题四“钛合金管材高效短流程关键技术研发”(编号: 2022YFB3705604)。

参考文献

- [1] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8, 24.
- [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] 刘欣, 杨景超, 李恒, 等. 管路构件塑性变形连接技术研究进展及挑战[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 179-199.
- [4] 郭克星. 钛合金的制备和应用[J]. 热处理, 2023, 38(5): 8-12.
- [5] 彭西洋, 李雪峰. 钛合金在汽车工业中的应用现状及前景展望[J]. 汽车工艺师, 2023(4): 56-59.
- [6] 王平, 杨绍兰, 杨荭培, 等. 钛合金在油气行业的应用及研究进展[J]. 世界石油工业, 2023, 30(6): 69-78.
- [7] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [8] 温景林, 丁桦, 曹富荣, 等. 有色金属挤压与拉拔技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] 孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 钛合金管材挤压成形数值模拟及实验研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 25-29.
- [10] 张永强, 冯永琦, 李渭清, 等. TC4 合金管材挤压成型工艺研究[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(10): 27-29.
- [11] 张大伟, 赵升吨, 朱成成, 等. 钛合金实心锭穿孔挤压穿孔过程有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 86-91.