

轧制

工艺参数对TA2工业纯钛无缝管热连轧力能参数的影响

董博文¹, 双远华¹, 陈 晨², 李 潮², 刘旭涛¹

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对TA2工业纯钛无缝管生产成本低、能耗大且成材率低等问题, 采用实验和有限元分析相结合的方法, 进行纵连轧生产钛管新工艺的探索性研究。借助DEFORM-3D有限元软件, 对TA2工业纯钛管材纵连轧过程进行模拟, 建立了钛管纵连轧工艺轧制力数学模型, 完成了轧制力能参数的求解, 并研究了不同总压下率和初轧温度下轧制力以及轧制力矩的变化规律。最后, 通过实验验证了模拟的正确性。研究表明: TA2工业纯钛管材在稳定区的纵连轧轧制力和轧制力矩均与总压下率呈正相关, 与初轧温度呈负相关, 并且轧制力和轧制力矩的变化趋势完全相同。

关键词: TA2工业纯钛; 纵连轧; 轧制力; 轧制力矩; 压下率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.013

中图分类号: TG339

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 02-0094-10

Influence of process parameters on force and energy parameters for TA2 industrial pure titanium seamless pipe in hot continuous rolling

Dong Bowen¹, Shuang Yuanhua¹, Chen Chen², Li Chao², Liu Xutao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For the disadvantages of high production cost, large energy consumption and low yield of TA2 industrial pure titanium seamless pipe, a new process of longitudinal continuous rolling for titanium pipes was researched by combining experiment and finite element analysis. The longitudinal continuous rolling process of TA2 industrial pure titanium pipe was simulated by finite element software DEFORM-3D, and the mathematical model of rolling force for the longitudinal continuous rolling process of titanium pipe was established. Furthermore, the solution of rolling force and energy parameters was completed, and the change law of rolling force and rolling moment under different total reduction rates and initial rolling temperatures was studied. Finally, the correctness of the simulation was verified by experiments. The research results show that the rolling force and rolling moment of longitudinal continuous rolling for TA2 industrial pure titanium pipe in the stable zone are positively related to the total reduction rate and negatively related to the initial rolling temperature, and the change trend of rolling force and rolling moment is completely the same.

Key words: TA2 industrial pure titanium; longitudinal continuous rolling; rolling force; rolling torque; reduction rate

在金属铁和金属铝之后, 纯钛和钛合金被誉为“第三金属”, 他们在地壳中的储量极为丰富, 凭借优异的力学性能以及生物相容性成为当今最理想的金属材料之一^[1-2]。纯钛和钛合金与其他金属材料相比, 拥有更高的比强度、更低的密度、更强的耐热性、无磁性、较低的热膨胀系数以及更高的耐腐

蚀性, 因此, 常被誉为“宇宙中的金属”和“海洋中的金属”。近年来, 随着人们对航空航天技术需求的不断增加, 纯钛及其合金已广泛应用于航空领域和民用领域^[3]。工业纯钛具有出色的冷热加工特性, 能够在常规设备上执行锻造、挤压、轧制和拉伸等多种加工操作, 从而生产出多种规格的板材、带材、型材、管材、棒材以及丝材。

目前, 纯钛管材的生产主要依赖于挤压、轧制、拉拔和旋压等多种制造技术。王怀柳^[4]深入研究了TA2工业纯钛管材挤压过程中挤压温度、玻璃润滑方式、挤压速度等多种工艺参数对挤压质量的影响, 确定了最佳的工艺参数, 进而制得了优质的管材。郭玲等^[5]通过提高挤压比解决了纯钛挤压管坯的品

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-08-15

基金项目: 山西省科技重大专项项目 (20191102009); 山西省自然科学基金资助项目 (202203021221158)

作者简介: 董博文 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2640340261@qq.com

通信作者: 双远华 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: yhshuang@tyust.edu.cn

质问题，成功将挤压比从 14.2 增加至 22.9。此外，还使用了新型的水基润滑剂来优化挤压过程中的摩擦环境，从而提高了生产效率并减少了材料的消耗。

杨英丽等^[6]研究了氧含量、无缝管材的轧制工艺参数 Q 值（相对减壁量与相对减径量之间的比率）等因素对管材强度和塑性的影响，发现氧含量为 0.08%~0.13% 时可以得到强度高、塑性好的管材，而当 $1.2 \leq Q < 2.3$ 时可以得到综合性能出色的纯钛管材。负鹏飞等^[7]探讨了 Q 值对小口径 TA2 工业纯钛管材的结构和性质的影响，研究表明，当 Q 值维持在 1.65、变形率达到 53.3% 的条件下， $\Phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 TA2 工业纯钛管材展现出最理想的强塑性特性。Pumpyanskiy D A 等^[8]对热挤压后的管材进行了冷轧实验，得到不同变形量下管材强度和塑性的变化规律，以轧后最大伸长率不得低于 10% 为临界值，认为 PT-1M（TA2）、PT-7M（TA16）以及 Ti-3AL-2.5V（TA18）钛管的最大变形量分别不得超过 55%、50% 及 40%。李永林等^[9]对两辊冷轧成品管的可行性进行了深入研究，发现当两辊冷轧的道次加工率达到 64% 时，轧制出的管材表面会呈现出光滑和平整的质感，随着道次数的增加，其组织由粗大晶粒变为细小均匀且不含晶界缺陷的针状铁素体组织；当两辊冷轧过程中道次加工率提升至 76% 时，管材的外表面会出现显著的纵向轧制流线和微小裂纹。

Xing J 等^[10]应用不同锥角组合对 TA2 工业纯钛管材进行了拉拔，对比了不同锥角组合对 TA2 工业纯钛管材的显微组织及再结晶织构的影响。研究发现，由不同的锥角制备的 TA2 工业纯钛，其显微组织特征并无明显差异；同样，同一款管材在 $RD-TD$ （轧制方向-横向）和 $AD-TD$ （轴向-横向）方向上的显微结构也并未表现出显著的不同。

马浩^[11]研究发现，在旋压工艺中 TA2 工业纯钛容易发生韧性断裂，并揭示了筒形件和板材可旋性实验中旋压破裂的韧性断裂机制，分析了应力、应力状态等因素对 TA2 纯钛板材可旋性实验韧性断裂行为的影响。

轧制力和轧制力矩与多种因素有关，包括但不限于工艺参数中的初轧温度、压下率、孔型参数、轧制速度和轧辊直径，还与材料的变形抗力、摩擦因数等有关。本文基于课题组之前的研究成果^[12]，并结合 TA2 工业纯钛管材的纵连轧工艺特性，采用数值模拟与实验相结合的手段，对不同工艺参数对 TA2 工业纯钛管材纵连轧力能参数的影响进行了深入探讨。

1 材料与方法

1.1 纵连轧有限元模拟模型的建立

根据实际生产工业纯钛管材的纵连轧工艺，利用 Solidworks 软件建立实体模型，并导入 Deform-3D 有限元模拟软件，建立 TA2 工业纯钛管材的纵连轧模型。由于模拟计算量太大，取 1/6 模型进行模拟，如图 1 所示。

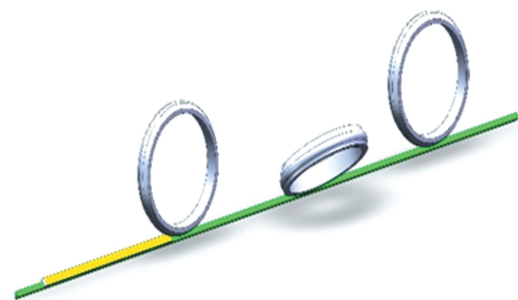


图 1 TA2 工业纯钛管材纵连轧有限元模型
Fig. 1 Finite element model of longitudinal continuous rolling for TA2 industrial pure titanium pipe

实验用 TA2 工业级纯钛管材的化学成分如表 1 所示，纵连轧的模拟参数如表 2 所示，工艺参数如表 3 所示。

表 1 TA2 工业纯钛管材的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of TA2 industrial pure titanium pipe（%，mass fraction）

Fe	C	O	N	H	Ti
0.25	0.08	0.25	0.03	0.015	余量

表 2 TA2 工业纯钛管材纵连轧模拟参数
Table 2 Simulation parameters of longitudinal continuous rolling for TA2 industrial pure titanium pipe

参数	数值
轧制工具温度/℃	20
摩擦因数	0.5
比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	102
导热性/(W·(m·K) ⁻¹)	35
导热系数	0.11
热交换系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	0.02
轧辊温度/℃	150
芯棒温度/℃	150
初轧温度/℃	750、800、850

表 3 TA2 工业纯钛管材纵连轧工艺参数
Table 3 Process parameters of longitudinal continuous rolling for TA2 industrial pure titanium pipe

参数	数值
相邻机架间距/mm	500
轧辊中心线与轧制中心线距离 r /mm	170
总压下率为 10% 的芯棒直径/mm	$\Phi 35$
总压下率为 20% 的芯棒直径/mm	$\Phi 36$
总压下率为 30% 的芯棒直径/mm	$\Phi 37$
芯棒插入速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	140
芯棒轧制时速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	40
轧辊最大转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	30
轧辊最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	5000
轧辊宽度/mm	100
第 1 机架辊缝半径/mm	21.09
第 2 机架辊缝半径/mm	20.00
第 3 机架辊缝半径/mm	20.00
第 1 机架轧制半径/mm	24.40
第 2 机架轧制半径/mm	22.00
第 3 机架轧制半径/mm	22.00

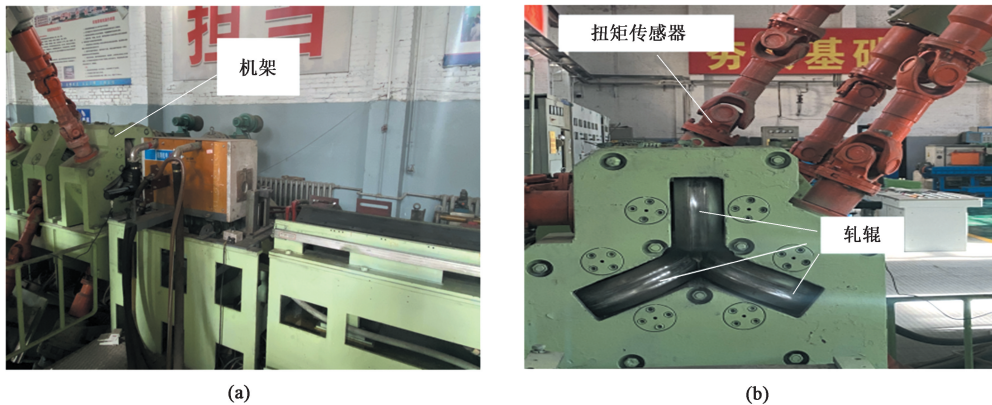


图 2 轧机本体 (a) 和机架 (b)
Fig. 2 Body (a) and frame (b) of rolling mill

1.3.1 连轧机组接触面积

计算轧制力前, 首先需要确定减壁区和减径区的接触面积, 本课题是基于对长芯棒连轧无缝钢管的生产研究, 因此, 采用接触弧的水平投影面积进行计算^[14]。

减径区接触弧的水平投影面积 F_1 为:

$$F_1 = \frac{1}{2} d_m \left[\sqrt{\frac{D}{2} (b_{x-1} - a_x)} - \sqrt{D \cdot \Delta h_x} \sin(\varphi - \beta) \right] \quad (2)$$

式中: d_m 为芯棒直径, mm; D 为轧辊的名义直径, mm; b_{x-1} 为前一机架的孔型宽度, mm; a_x 为讨论机架的孔型高度, mm; Δh_x 为第 x 机架的减壁量, mm;

1.2 实验方法

为了确保模拟数据的实用性和稳定性, 在太原科技大学自主研发的轧机上进行了 TA2 纯钛管材的纵连轧实验, 图 2 为轧机的本体和机架。实验条件与模拟条件高度一致, 最终利用图 2 中的轧机对模型进行验证。

1.3 连轧轧制力计算

本次使用的轧机类型为限动芯棒类, 在管材经过连轧机组的各个机架时, 根据管材变形特征, 会将管材沿轧制方向分为减径区和减壁区。在进行轧制力计算之前, 应先建立轧制力模型, 求解变形区接触弧水平投影面积, 并由此求出变形区水平投影面积, 然后求出变形区的平均压力^[13]。因此, 总的轧制力为减径区和减壁区两部分的合力。

$$P = p_1 F_1 + p_2 F_2 \quad (1)$$

式中: P 为总轧制力, N; p_1 为减径区的平均压力, ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$); F_1 为减径区接触弧的水平投影面积, mm^2 ; p_2 为减壁区的平均压力, ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$); F_2 为减壁区接触弧的水平投影面积, mm^2 。

φ 为孔型开口角, ($^\circ$); β 为管材内壁与芯棒接触区占整个截面内壁的中心角, ($^\circ$)。

β 的计算公式如下:

$$\beta = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_x}{d_m} \right) \quad (3)$$

减壁区接触弧的水平投影面积 F_2 为:

$$F_2 = C (d_m + 2h) \sqrt{D \Delta h_x} \cos(\varphi - \beta) \quad (4)$$

式中: h 为管材孔型处壁厚, 等于前一机架的壁厚, mm; C 为系数, $\beta=0$ 时, $C=0.74$ 。

1.3.2 平均压力

减径区的轧制力 \bar{p}_1 为:

$$\bar{p}_1 = \eta k \frac{2\Delta h_x}{d_{px}} \quad (5)$$

式中： η 为考虑非接触区影响系数； k 为变形抗力，MPa； d_{px} 为第 x 机架减径区孔型平均高度，mm。

d_{px} 和 η 的计算公式为：

$$d_{px} = \frac{1}{2} [b_{x-1} + D_0 - \sqrt{(D_0 - a_x)^2 - 4l_2^2}] \quad (6)$$

$$\eta = 1 + 0.9 \frac{d_{px}}{l_1} \sqrt{\frac{h}{d_{px}}} \quad (7)$$

式中： D_0 为轧辊的工作直径，mm； l_1 为长芯棒减径区长度，mm； l_2 为孔型底部减径区长度，mm。

通过对板材轧制过程轧制力的计算，类比出使用采利可夫曲线来拟合减壁区的轧制力^[15-16]，计算公式为：

$$\bar{p}_2 = 174.127 \left(0.72 + \frac{0.28l_2}{h_m} \right) \times \exp(-2.157 \times 10^{-4} T) e^{0.4113} e^{0.1615} \quad (8)$$

式中： h_m 为管材平均壁厚，mm； T 为温度，℃； e 为管材变形程度； \dot{e} 为管材在减壁区的变形速度，(m·s⁻¹)。

e 和 \dot{e} 的计算公式如下：

$$e = \ln \frac{h_{x-1}}{h_x} \quad (9)$$

$$\dot{e} = \frac{2v}{h_{x-1} + h_x} \alpha_2 \quad (10)$$

式中： h_x 为讨论机架的管材壁厚，mm； h_{x-1} 为前一机架的管材壁厚，mm； v 为管材在机架中的速度，(m·s⁻¹)； α_2 为第 2 次咬入角，(°)。

1.3.3 理论解析结果验证

理论解析是否可靠必须依据实验实际生产出的数据进行对比。管材在纵连轧 3 机架机组下，稳态轧制段第 2 机架轧制力及轧制力矩的理论计算与实验结果见图 3。

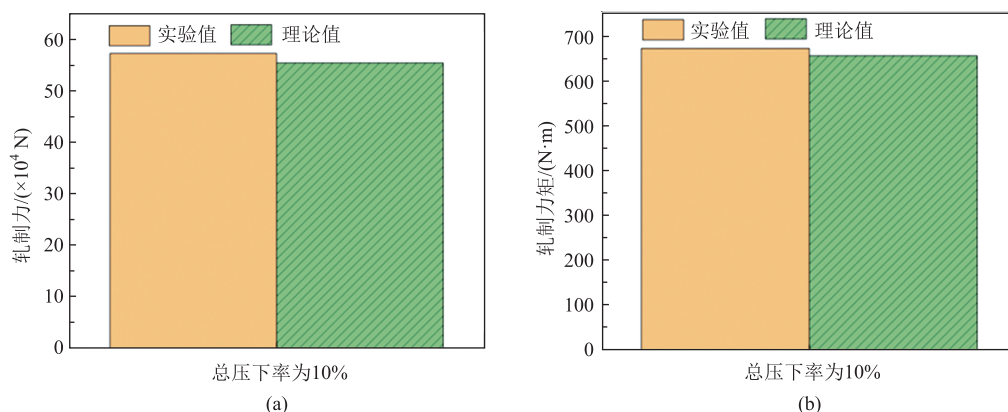


图3 理论与实验的力能参数对比

(a) 轧制力 (b) 轧制力矩

Fig. 3 Comparison of force and energy parameters between theoretical and experimental results

(a) Rolling force (b) Rolling torque

图 3a 和图 3b 显示，在 3 机架机组下，TA2 工业纯钛无缝管热连轧轧制力和轧制力矩的理论解析结果相差不大，当总压下率为 10% 时，轧制力理论与实验结果的误差为 3.3%，轧制力矩理论与实验结果的误差为 2.5%，误差在允许范围内。

1.4 有限元模型验证

图 4 展示了在总压下率达到 10% 的情况下，工业使用的 TA2 纯钛管材纵连轧过程的有限元模拟与实际实验中的轧制力和轧制力矩数据。经过对比分析发现，TA2 工业纯钛管材轧制的有限元模拟数据与实验数据相当接近，这进一步证实了构建的有限元模型的准确性和可靠性。

图 5 为 TA2 工业纯钛在不同的总压下率下轧制力

和轧制力矩的对比，模拟值与实验值相差的最大值发生于总压下率为 10% 时，轧制力相差最大值为实验值的 5.4%，轧制力矩相差最大值约为实验值的 5.3%。产业差异的原因可能是实际应用中管材存在几何尺寸偏差，而仿真时使用的是理想化的几何模型。

2 结果与讨论

2.1 总压下率对 TA2 工业纯钛管材纵连轧轧制力的影响

轧制温度为 800 ℃，总压下率为 10%、20% 和 30% 时的 TA2 工业纯钛管材纵连轧轧制力曲线如图 6 所示。

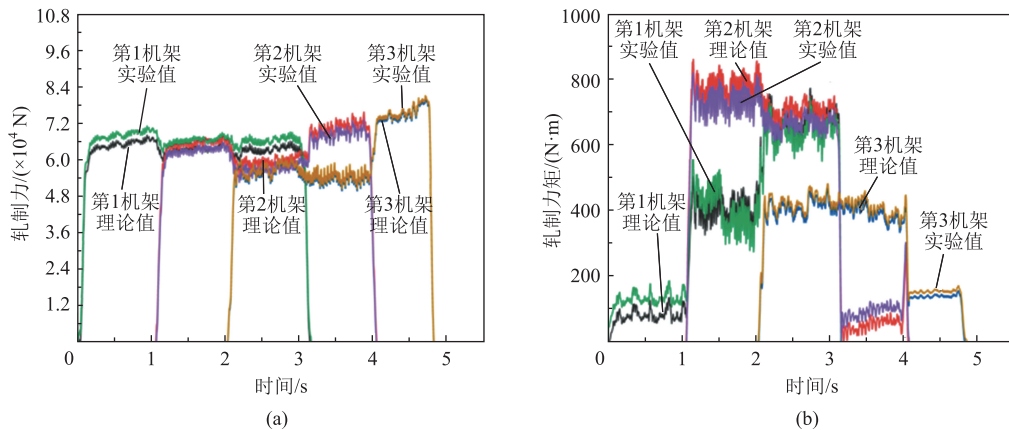


图 4 轧制力 (a) 和轧制力矩 (b) 曲线的对比

Fig. 4 Comparison of rolling force (a) and rolling torque (b) curves

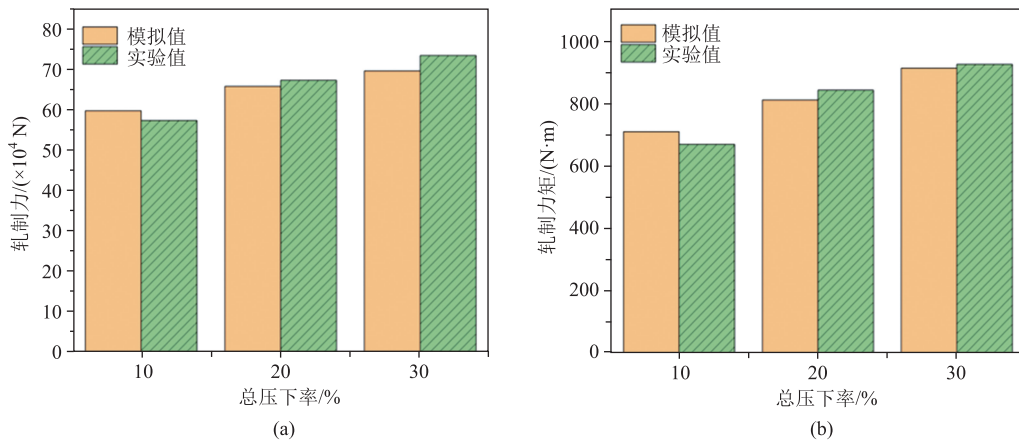


图 5 不同总压下率下的轧制力 (a) 和轧制力矩 (b) 对比

Fig. 5 Comparison of rolling force (a) and rolling torque (b) under different total reduction rates

通过观察管材轧制过程中的变形量布局可以确认,在绝大部分情形下,单数和双数机架的总压下率均必须保持一致。在本文针对 3 机架轧机展开的研究中发现,第 2 机架的总压下率实际上是第 1 和第 3 机架总压下率的综合,意味着第 2 机架的压下程度与整个轧制系统的整体压下程度相等。因此,在处理 TA2 工业纯钛管材纵连轧的各种拉力和扭矩数据时,可以选择第 2 机架作为研究对象。

在使用 TA2 工业纯钛管材进行纵连轧的操作中,表 4 详细记录了在不同总压下率下产生的稳态应变以及第 2 机架上的轧制力。表 4 显示,3 机架同步对管材变化区域进行轧制,并与图 6 的 3 机架曲线交叉,生成了轧制力。

从图 6 和表 4 可以得出以下结论。

(1) 在 TA2 工业纯钛管材的连轧稳定阶段,特定机架的轧制力会随着机架的咬入阶段逐步减少,但是在下一个机架的咬入阶段开始时,轧制力会逐

步增加,从而导致波动。这种情况产生的根本原因在于,当机架被咬入并即将进入下一机架时,管材和轧辊会产生冲击。为了避免这一现象发生,在进行轧机控制前,首先要确定轧辊的实际运行参数。轧辊的移动速度是基于一个恒定的前进速率来确定的,这使得管材遭受了一定的阻力。为了消除这一影响,即必须提高机架的总压下率,以减小摩擦力,使之与上一机架的轧件形成一定程度的挤压变形量。因此,在机架内部金属的含量有所上升,这进一步增强了轧制的力量,使其达到一个稳定的水平^[17]。

(2) 在 TA2 工业纯钛管材的纵连轧过程中,随着总压下率的逐步增加,稳定轧制区(即第 2 机架)内的管材所承受的轧制力也会相应地增加。从总压下率为 10% 时的 59.6 kN 增长至 30% 时的 69.4 kN,这一增长率高达 16.44%。从不同阶段轧制时获得的轧制力看,其变化曲线基本符合线性关系,但在一定范围内变化趋势是有差异的。随着总

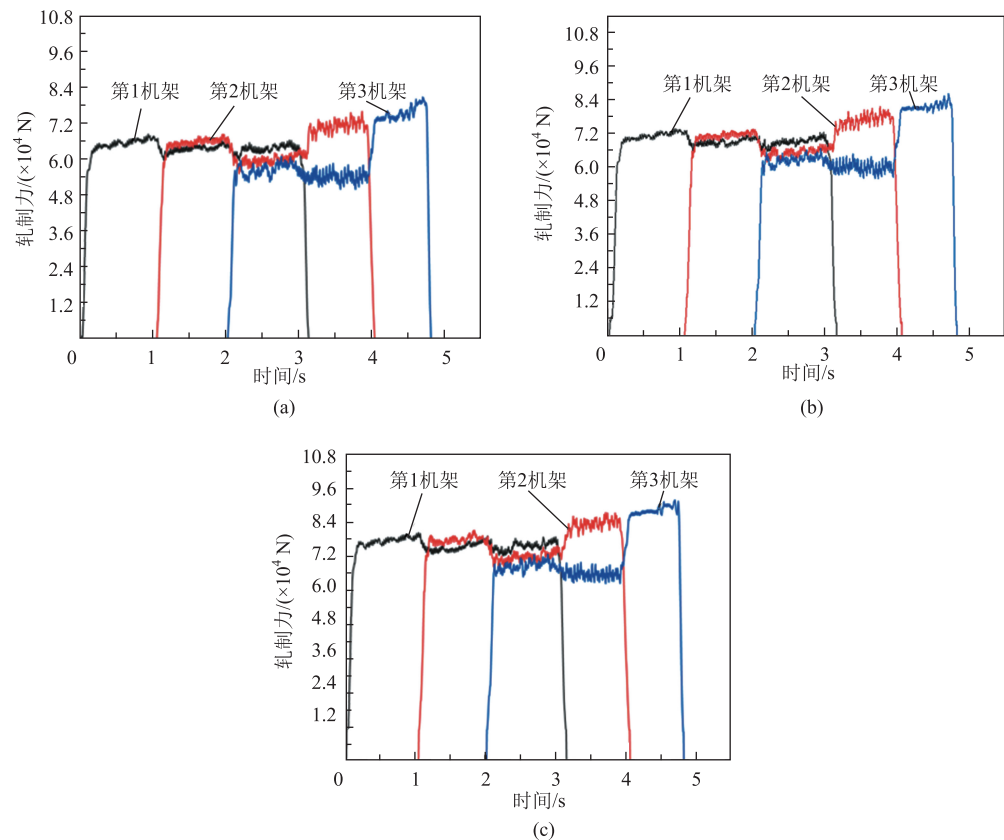


图 6 不同总压下率下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力曲线
(a) 总压下率为 10% (b) 总压下率为 20% (c) 总压下率为 30%

Fig. 6 Rolling force curves of longitudinal continuous rolling for TA2 industrial pure titanium pipe under different total reduction rates
(a) Total reduction rate of 10% (b) Total reduction rate of 20% (c) Total reduction rate of 30%

表 4 不同总压下率下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力
Table 4 Rolling forces of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling with different total reduction rates

总压下率/%	轧制力/kN
10	59.6
20	65.6
30	69.4

压下率的持续上升，轧制力的增长可以被解释为：在纵连轧过程中，TA2 工业纯钛管材经受了逐渐加深的形变，这导致了管材内部的应力和应变持续上升，从而使得其变形的抗力也逐渐增强；同时，由于轧制力的作用，使得管材表面产生大量塑性变形。随着内部应变的增长，能量消耗也相应增大，这意味着需要更多的能量来支持管材的变形，同时轧制力也会逐步上升。

2.2 总压下率对 TA2 工业纯钛管材纵连轧轧制力矩的影响

当初轧温度为 800 ℃，总压下率为 10%、20%

和 30% 时，由 TA2 工业纯钛管材经过连续轧制得到的 3 机架轧制力矩结果如图 7 所示，第 2 机架稳定变形区域的轧制力矩如表 5 所示。

通过图 7 以及表 5 的分析，可以明显观察到以下情况。

(1) 在稳定轧制区域，TA2 工业纯钛管材在第 2 机架位置的轧制力矩与总压下率之间存在正相关，即轧制力矩会随着总压下率的提高而相应增大。具体为，从总压下率为 10% 时的 707 N·m 到 30% 时的 909 N·m，上升了 22.2%。

(2) 在连续轧制的稳定阶段，第 2 机架的轧制力矩明显高于第 3 机架，这说明张力虽然存在，但是较小，只能减少部分轧制力矩，所以，第 2 机架的轧制力矩还是高于第 3 机架^[18]。

2.3 初轧温度对 TA2 工业纯钛管材纵连轧轧制力的影响

当总压下率为 20%，初轧温度为 750、800 和 850 ℃ 时，TA2 工业纯钛管材轧制力曲线如图 8 所示，第 2 机架稳定变形区域的轧制力如表 6 所示。

通过图 8 和表 6 的分析，可以得出以下结论。

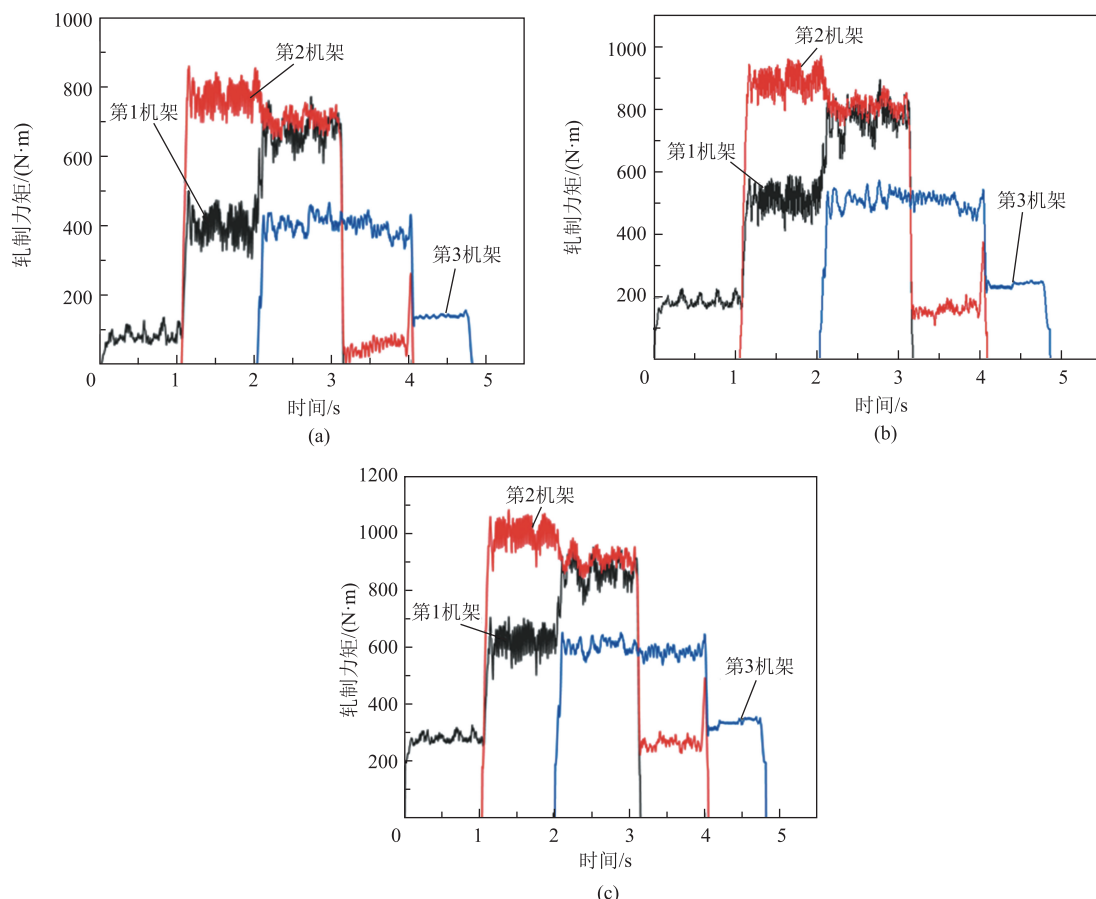


图 7 不同总压下率下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力矩曲线

(a) 总压下率为 10% (b) 总压下率为 20% (c) 总压下率为 30%

Fig. 7 Rolling torque curves of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling with different total reduction rates

(a) Total reduction rate of 10% (b) Total reduction rate of 20% (c) Total reduction rate of 30%

表 5 不同总压下率下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力矩
Table 5 Rolling torques of TA2 industrial pure titanium pipe
during longitudinal continuous rolling with different total
reduction rates

总压下率/%	轧制力矩/(N·m)
10	707
20	808
30	909

(1) 在稳定轧制区域, TA2 工业纯钛的轧制力与初轧温度呈负相关, 即轧制力随着初轧温度的增大而减小。由 750 ℃ 时的 76.4 kN 减小至 850 ℃ 时的 44.0 kN, 下降了 42.4%。

(2) 在 750~850 ℃ 这一温度区间内, TA2 工业纯钛随着初轧温度的上升, 材料本身的变形抗力逐渐下降, 在相同的变形量下所做出的塑性变形功也会减小。

2.4 初轧温度对 TA2 工业纯钛管材纵连轧轧制力矩的影响

当总压下率为 20%, 初轧温度为 750、800 和

850 ℃ 时, TA2 工业纯钛管材的轧制力矩曲线如图 9 所示, 第 2 机架稳定变形区域的轧制力矩如表 7 所示。

通过图 9 和表 7 的分析, 可以得到以下结论。

(1) 在稳定轧制区域, TA2 工业纯钛管材的轧制力矩与初轧温度呈负相关, 即轧制力矩随着初轧温度的增大而减小。由 750 ℃ 时的 886 N·m 减小至 850 ℃ 时的 553 N·m, 下降了 37.6%。

(2) 随着初轧温度逐渐上升, 管材与轧辊的接触面变大, 使得材料的变形温度降低, 综合这两种温度的变化趋势, 最终可以观察到温度降低的幅度比温度上升更为明显。然而, 由于开始时的变形温度以明显的梯度上升, 所以, 材料受到的变形抗力会随着初轧温度的提高而减少, 同时轧制力矩也会相应下降^[19]。

3 结论

(1) TA2 工业纯钛管材纵连轧稳定轧制阶段,

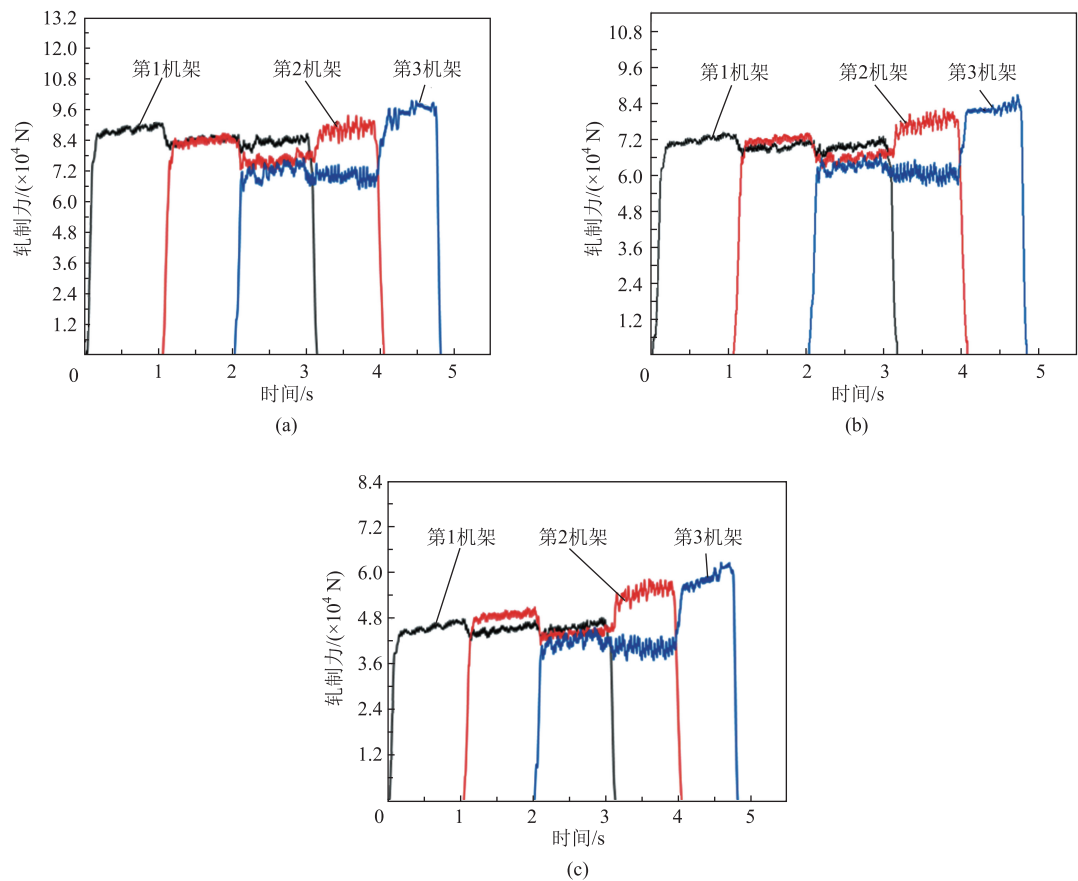


图 8 不同初轧温度下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力曲线
(a) 初轧温度为 750 ℃ (b) 初轧温度为 800 ℃ (c) 初轧温度为 850 ℃

Fig. 8 Rolling force curves of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling at different initial rolling temperatures
(a) Initial rolling temperature of 750 ℃ (b) Initial rolling temperature of 800 ℃ (c) Initial rolling temperature of 850 ℃

表 6 不同初轧温度下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力
Table 6 Rolling forces of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling at different initial temperatures

初轧温度/℃	轧制力/kN
750	76.4
800	65.6
850	44.0

轧制力与轧制力矩均随着总压下率的增大而增大，随着初轧温度的升高而减小。

(2) 在 TA2 工业纯钛管材的连续轧制稳定阶段，特定机架的轧制力在其咬入过程中开始减少。而在下一个机架进入咬入时轧制力逐渐增大，呈现出波动的趋势。管材进入下一个机架的过程会产生一定的阻力，这会导致上一个机架的金属量增加，从而使得轧制力也相应地变大。

(3) 随着初轧温度的升高，管材与轧辊的接触面积增大，因此，材料温度会下降，并且温降程度

大于温升程度，又因为初轧温度是升高的，所以，材料的变形抗力会减少，轧制力矩也会下降。

参考文献：

[1] 刘以波. TA2 工业纯钛高温组织演变研究 [D]. 上海：上海交通大学，2010.
Liu Y B. Microstructure Evolution of TA2 Commercial Pure Titanium at High Temperature [D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University, 2010.

[2] 李彤，苏松林，安邦，等. 高性能低成本钛合金生产应用现状 [J]. 特钢技术，2024，30（3）：8-11，15.
Li T, Su S L, An B, et al. Current status of production and application of high-performance and low-cost titanium alloys [J]. Special Steel Technology, 2024, 30（3）：8-11，15.

[3] 尚筱迪. 工业纯钛 TA2 热压缩变形行为及微观组织演变 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2019.
Shang X D. Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of TA2 [D]. Xi'an：Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

[4] 王怀柳. 浅析工艺参数对 TA2 挤压管材质量的影响 [J]. 特钢技术，2016，22（2）：12-17.

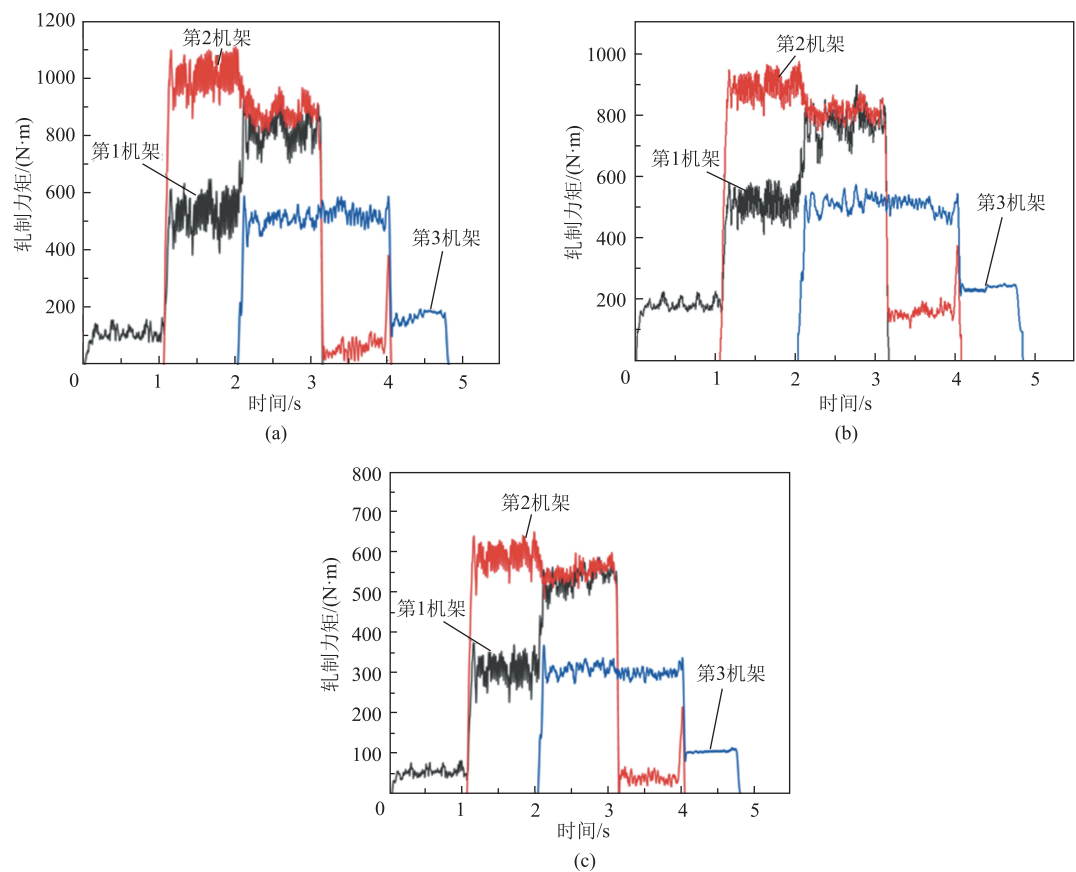


图 9 不同初轧温度下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力矩曲线
(a) 初轧温度为 750 ℃ (b) 初轧温度为 800 ℃ (c) 初轧温度为 850 ℃

Fig. 9 Rolling torque curves of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling at different initial rolling temperatures
(a) Initial rolling temperature of 750 ℃ (b) Initial rolling temperature of 800 ℃ (c) Initial rolling temperature of 850 ℃

表 7 不同初轧温度下 TA2 工业纯钛管材纵连轧的轧制力矩
Table 7 Rolling torques of TA2 industrial pure titanium pipe during longitudinal continuous rolling at different initial rolling temperatures

初轧温度/℃	轧制力矩/(N·m)
750	886
800	808
850	553

Wang H L. Influence of process parameters on the quality of TA2 extruded pipe [J]. Special Steel Technology, 2016, 22 (2): 12-17.

[5] 郭玲, 谢翀博. 纯钛管坯热挤压工艺改进 [J]. 机械制造, 2015, 53 (6): 71-73.

Guo L, Xie C B. Improvement of hot extrusion process for pure titanium tube billets [J]. Machinery, 2015, 53 (6): 71-73.

[6] 杨英丽, 卢亚锋, 郭获子, 等. 氧含量及轧制工艺对纯钛管材性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2011, 28 (5): 27-30.

Yang Y L, Lu Y F, Guo D Z, et al. Effect of oxygen content on properties of commercial pure titanium tubes [J]. Titanium Indus-

try Progress, 2011, 28 (5): 27-30.

[7] 贡鹏飞, 杨英丽, 郭获子, 等. 轧制 Q 值对小口径 TA2 管材组织和性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2012, 29 (2): 24-27.

Yun P F, Yang Y L, Guo D Z, et al. Effect of cold-rolling Q on microstructure and mechanical property of small-caliber TA2 tube [J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29 (2): 24-27.

[8] Pumpysanskiy D A, Illarionov A G, Vodolazskiy F, et al. Material science aspects of titanium tube production. Part 2: Production of cold-rolled tubes [J]. Metallurgist, 2024, 67 (9-10): 1482-1493.

[9] 李永林, 王璐, 孟鑫, 等. 两辊冷轧纯钛管材的工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (17): 42-45.

Li Y L, Wang L, Meng X, et al. Study on technology of cold rolling pure titanium tube with two rolls [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 42-45.

[10] Xing J, Chen H, Yang Y L, et al. Effect of drawing processing on mechanical properties and textures of TA2 pipes [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44 (2): 485-488.

[11] 马浩. 纯钛及钛合金强力旋压损伤演化规律及韧性断裂预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

(下转第 124 页)