

冷轧 TA1 钛带表面形貌演变分析

韩盈¹, 刘思涵¹, 余伟^{1,2}, 曹聪¹

(1. 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 高效轧制与智能制造国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 钛带的表面状态一直是研究者重点关注的对象。为此, 围绕 TA1 钛带冷轧后表面形貌的形成规律开展深入研究。通过观察不同轧制道次的 TA1 钛带表面形貌, 发现喷丸处理形成的均匀凹坑, 在后续轧制过程中数量不断减少, 同时出现并逐渐凸显鳞片状形貌。在轧制过程中, 工作辊表面的“凹陷犁沟”和“凸起微峰”会转印到钛带表面, “凸起微峰”轧平后形成鳞片状形貌, 且轧制压下量越大, “凸起微峰”处折叠越严重。研究提出, 减小后续道次压下率、改善润滑条件和降低工作辊表面粗糙度, 能够有效改善鳞片状形貌, 进而提升 TA1 钛带的表面质量, 为优化 TA1 钛带冷轧工艺提供理论依据。

关键词: TA1 钛带; 冷轧; 表面形貌; 鳞片

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)04-014-06

Analysis of Surface Morphology Evolution of Cold-rolled TA1 Titanium Strip

Han Ying¹, Liu Sihan¹, Yu Wei^{1,2}, Cao Cong¹

(1. Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. National Engineering Research Center for Flat Rolling Equipment, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The surface condition of titanium strip has always been a key focus of researchers. This study investigates the formation rules of the surface morphology of TA1 titanium strip after cold rolling. By observing the surface morphology of TA1 titanium strip at different rolling passes, it is found that the uniform pits formed by shot peening gradually decrease in number during subsequent rolling, while a scaly morphology emerges and gradually becomes more prominent. During the rolling process, the valleys and peaks on the work rolls surface will be transferred to the titanium strip surface. After the protrusions on the titanium strips are flattened, the scaly morphology is formed. Moreover, the greater the rolling reduction, the more severe the folding at the protrusions on the titanium strips. This study proposes that reducing the reduction in subsequent passes, improving the lubrication conditions, and reducing the surface roughness of the work rolls can effectively improve the scaly morphology, thereby enhancing the surface quality of TA1 titanium strip and providing a theoretical basis for optimizing the cold rolling process of TA1 titanium strip.

Keywords: TA1 titanium strip; cold rolling; surface morphology; scaly

钛合金因具备高强度、低密度、优良耐腐蚀性、高耐热性和生物相容性等特性, 广泛应用于航空航天、海洋工程、生物医疗和石油化工等领域^[1-4]。钛合金产品有多种类型, 如板材、棒材、管材和带材等, 其中, 带材是众多产品中用量较多的一种类型^[5-6]。钛带通常

经熔炼、锻造、热轧、冷轧和热处理等工艺加工而成。冷轧作为钛带产品的最终变形工艺, 在这一过程中, 带材表面会形成氧化色斑、异物附着、沟槽、隆起、凹坑、划痕、毛刺等异常缺陷^[7-9]。钛带的表面质量一直是生产企业、下游客户和终端消费者共同关注的核心问题, 不仅会影响钛带后续的成形性能, 还会直接影响钛带在高端市场中的竞争力^[10]。

收稿日期: 2025-04-02

通信作者: 余伟 (1968—), 男, 教授。

随着航空航天、生物医疗等高端领域对钛带表面质量要求的不断提高, 钛带生产技术必须进一步创新, 以满足这些行业对高质量材料的需求^[1]。未来, 钛及钛合金的表面质量控制将更加精细化。因此, 研究钛带表面状态的形成机制具有重要意义。本研究借助扫描电子显微镜和光学显微镜对 TA1 钛带的表面进行形貌表征, 并结合有限元模拟软件, 分析其表面形貌的形成机理, 以期为钛带工业生产中的表面质量控制提供参考。

1 实验

实验材料为经过喷丸处理的 TA1 钛带。采用气动喷丸机进行喷丸处理, 弹丸为直径 0.4 mm 的陶瓷丸, 喷丸强度为 0.20~0.30 mm (A 型试片), 喷丸覆盖率为 100%~300%。采用 20 辊冷轧机对 TA1 钛带进行往复轧制, 并在轧制道次之间阶段性暂停, 调整带材位置, 使未轧制区域进入轧制区。为了探究冷轧带材表面形貌的形成原因, 采用光学显微镜对打磨后即将工作的冷轧机工作辊的表面形貌进行观察。工作辊直径约 60 mm, 观察位置位于工作辊中间。先用酒精去除表面油污, 再进行冷风吹干处理。

在不同轧制道次的 TA1 钛带上取样, 制备 0 道次 (初始状态为抛丸后的状态, 厚度 4 mm)、1 道次 (厚度 3 mm)、3 道次 (厚度 2.3 mm) 和 5 道次 (厚度 2 mm) 的样品。如图 1 所示, 在含有过渡区及两道次表面位置 (虚线位置) 取样, 观察样品在轧制道次及变形区的不同表面形态。为防止轧制后的样品表面受

到污染, 在取样过程中采用慢走丝切割工艺。

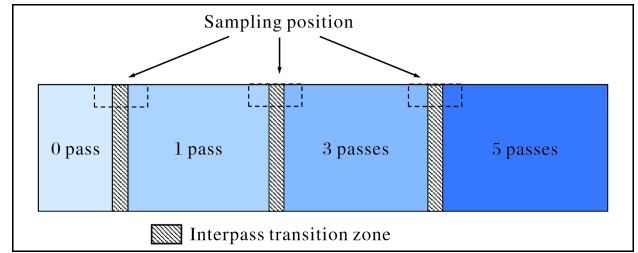


图 1 TA1 钛带取样位置示意图

Fig.1 Schematic diagrams of sampling locations for TA1 titanium strip

样品经酒精清洗并吹干后, 采用 QUANTA FEG 450 型场发射扫描电镜 (SEM) 对样品的微观形貌进行观察, 采用光学显微镜 (OM) 对工作辊的表面形貌进行观察。采用 ABAQUS 有限元软件模拟 TA1 钛带冷轧变形过程, 以推演表面状态的演变过程。

2 结果与分析

2.1 TA1 钛带表面形貌分析

图 2 是不同冷轧道次下 TA1 钛带的表面形貌。从图 2 可知, 0 道次的带材表面分布有均匀的凹坑, 是抛丸处理留下的印迹。经过 1 道次轧制后, 带材表面形貌分层, 由鳞片和凹坑组成, 且凹坑深度变浅, 鳞片附着在带材表面, 无鳞片处呈浅沟壑状。随着冷轧道次的增加, 带材表面的凹坑数量大大减少, 3 道次相比于 1 道次减少了 70%; 部分鳞片被压入带材表面,

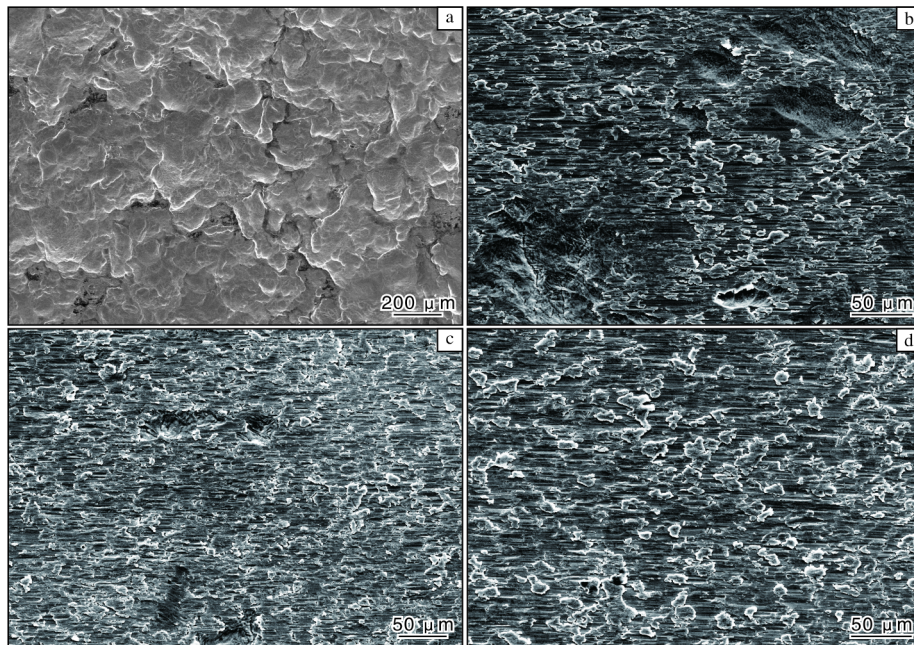


图 2 冷轧各道次的 TA1 钛带表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of TA1 titanium strip at each pass cold rolling: (a) 0 pass; (b) 1 pass; (c) 3 passes; (d) 5 passes

在凹坑处产生折叠缺陷。经过 5 道次轧制后，带材表面几乎没有凹坑，鳞片附着的形貌更加明显，无鳞处的沟壑较深。可以看出，多道次冷轧能够消除喷丸留下的凹坑，但会引入鳞片状形貌。

2.2 工作辊形貌分析

如图 3 所示，打磨后的工作辊表面有清晰可见的“凸起微峰”和“凹陷犁沟”样貌，这是打磨刀具在

工作辊表面留下的较重刻痕。工作辊表面的刻痕与打磨过程中的轧辊转速、砂轮转速、砂轮粒度有关，轧辊转速与砂轮转速决定了磨痕长度，砂轮粒度及进给量决定了磨痕宽度和深度。在工作辊打磨过程中，砂轮高速旋转与轧辊反向低速旋转，使轧辊表面磨削的划痕不至于过长，在工作辊表面形成“凸起微峰”和“凹陷犁沟”。

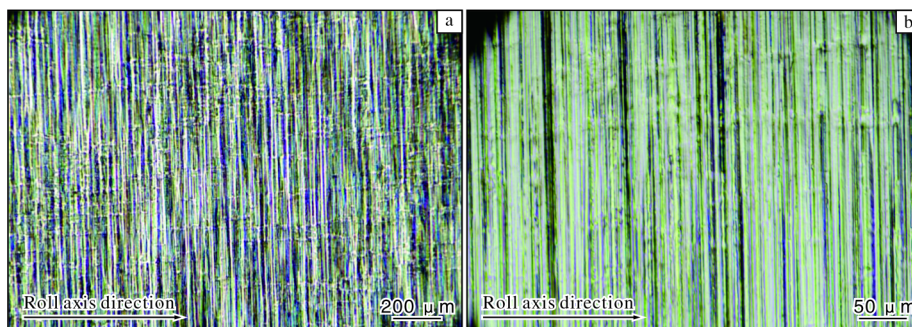


图 3 工作辊打磨后的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of work roll after grinding: (a) 5×; (b) 20×

2.3 变形区表面形貌演变分析

从图 2 可知，随着轧制的进行，TA1 钛带表面的凹坑逐渐消失，最终形成以鳞片和沟壑为主的形貌。该形貌的出现与轧辊密不可分。为了了解带材表面形貌的具体演变过程，采用有限元软件模拟冷轧过程中 TA1 钛带表面形貌演变。

由于轧辊的弹性变形相对于轧件的塑性变形较小，轧件的塑性变形不受轧辊弹性变形的影响，因此将轧辊设置为不可变形的离散刚体。为了提高计算速度，将钛带设为各向同性的弹塑性材料，同时使用 1/2 对称轧制模型进行简化处理。轧辊半径为 34 mm，表面呈周向分布深度为 4 μm 的梯形凸台，模拟轧辊的沟壑。图 4 为轧辊及其表面凸台示意图。模拟的轧制过程是将钛带按照压下量等比例缩小，模型中钛带厚度为 0.020 mm。根据轧制过程特点，计算所采用的单元类型为可用于三维应力的 C3D8R 单元。由于主要研究内容为轧辊凸台对应轧件区域的形状尺寸及应力-应

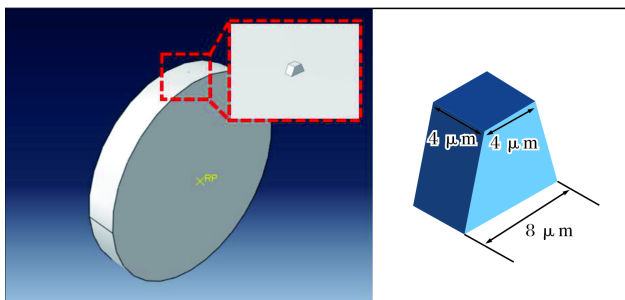


图 4 轧辊及其表面凸台示意图

Fig.4 Diagram of roll and surface boss

变，因此需要对该区域的网格进行适当细化以便得到更准确的模拟结果。远离该区域则可采用较大网格以提高计算效率。图 5 为 TA1 钛带网格划分示意图。

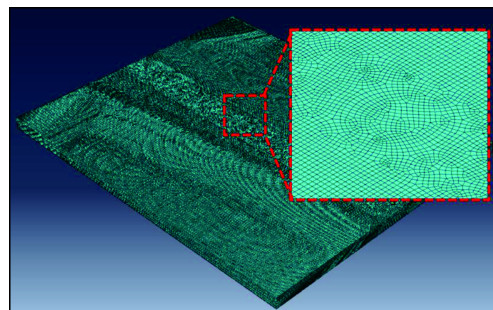


图 5 TA1 钛带网格划分示意图

Fig.5 Meshing diagram of TA1 titanium strip

本模型为显式动力耦合模型。在轧制过程中，轧辊与轧件之间设置为面对面接触，轧辊外表面刚度较大设为接触主面，轧件刚度较小设为接触从面。对于所有外表面和特征边设置为通用接触，轧辊与轧件之间的表面接触方式均选择表面与表面接触的形式，轧件与轧辊之间选择接触后分离的形式，力学约束类型均为运动摩擦，滑移公式选择有限滑移，其切向行为摩擦类型均为罚摩擦，摩擦系数为 0.2，法向行为设置为“硬”接触。轧辊转速设为 8 rad/s，轧辊初速度设为 0.25 m/s。本模拟为室温轧制过程，故不考虑材料的热物性质，轧件材质为 TA1 纯钛，密度为 4510 kg/m³，杨氏模量为 108 GPa，泊松比为 0.33，不考虑杨氏模量和泊松比随温度变化；Johnson-Cook 本构模型参数^[12]如表 1

所示。其中, A 为材料的初始屈服应力 (MPa), B 为应变硬化系数 (MPa), n 为应变硬化因子, m 为热软化系数。在软件计算过程中, 需要将参数涉及的物理单位转换为 mm 单位制导入程序。将以上材料参数输入 ABAQUS 有限元模拟软件建立相关材料属性。

表 1 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 1 Parameters of Johnson-Cook constitutive model			
A /MPa	B /MPa	n	m
285.7	566.1	0.5866	0.577

轧件厚度由 0.020 mm 减小至 0.015 mm, 变形量为 25%。图 6 为变形量 25% 的 TA1 钛带与轧辊的凸台局部接触区域不同接触阶段的等效应力分布和位移分布

布云图。从图 6 可以看出, 当凸台和带材发生接触时, 在带材表面印制出“凹陷犁沟”和“凸起微峰”。随着轧制进行, 轧辊表面凸台在轧件表面犁出的凹槽和凸起更加明显, 当“凸起微峰”和“凹陷犁沟”进入轧制变形区时, “凸起微峰”被轧平, 形成鳞片状形貌。轧辊表面凸台的存在会使轧件在轧制过程中的等效应力-应变分布不均匀。轧辊表面的凸台接触到轧件表面时, 会立刻在此处形成明显的应力集中区域, 如图 6a 所示; 伴随着轧制的进行, 该区域的应力逐渐增大。当“凸起微峰”处应力达到最大值时, “凸起微峰”处出现大应变区域, 在轧辊压下的作用下, 该区域形成折叠, 如图 6b、6c 所示。因此, 轧辊表面凸台是导致鳞片状形貌形成的原因。

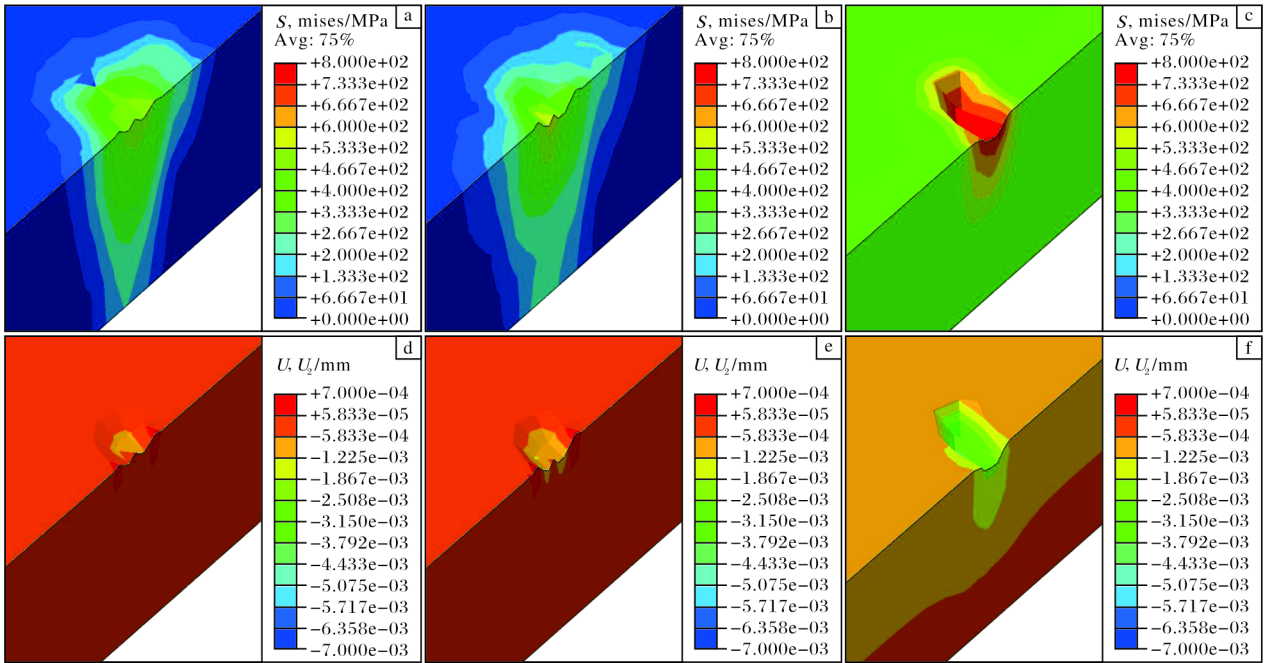


图 6 变形量 25% 的 TA1 钛带与轧辊凸台局部接触区域不同接触阶段的米塞斯应力分布云图和位移分布云图

Fig.6 Nephograms of (a-c) von Mises stress contour plot and (d-f) displacement magnitude contour plot in the local contact region between TA1 titanium strip with 25% deformation and the roll boss in different contact stages: (a, d) initial contact; (b, e) sustained contact; (c, f) contact termination

减少轧制变形量可有效抑制鳞片状形貌的形成。图 7 为变形量 15% (厚度由 0.020 mm 减小至 0.017 mm) 的 TA1 钛带与轧辊的凸台局部接触区域不同接触阶段的等效应力分布和位移分布云图。从图 7 可知, 凸台与带材刚接触、接触中和完成接触后, 局部的应力远小于变形量为 25% 时的应力。对比图 6 和图 7 可以看出, 变形量由 25% 下降至 15% 后, “凸起微峰”的高度降低, 折叠缺陷显著减少。

2.4 板材表面形貌形成机制

从冷轧 TA1 钛带的表面形貌可以清晰看到, 在

冷轧过程中工作辊表面形貌转印到 TA1 钛带表面。工作辊表面转印至轧件表面的程度与工作辊表面硬度、轧件表面硬度以及道次压下率相关。随着轧制道次增加, 总压下率增大, 轧辊表面磨痕凸起微峰导致轧件表面的凹痕深度变浅。然而, 工作辊表面形貌不可能完全转印至钛带表面, 存在一定程度的偏差, 主要原因有: ① 工作辊表面存在弹性变形; ② 变形量不足可能导致工作辊凹痕不充满; ③ 工作辊表面与轧带材表面在变形区速度场产生了后滑、前滑及表面摩擦。

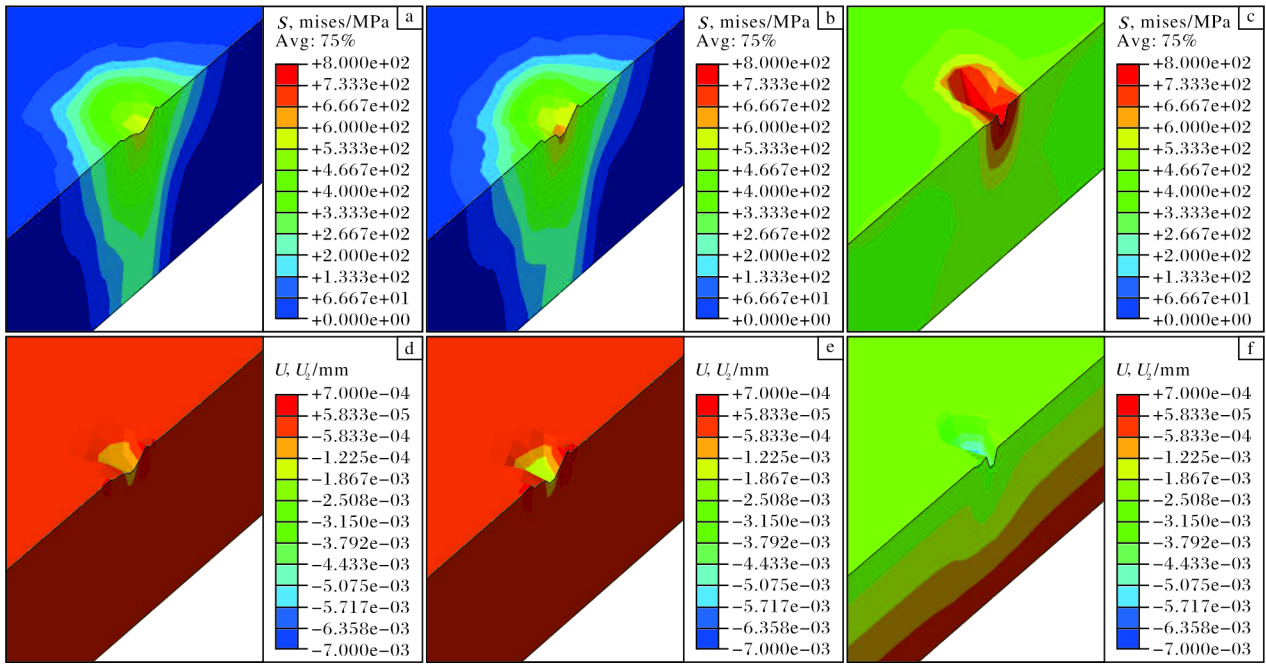


图7 变形量 15% 的 TA1 钛带与轧辊凸台局部接触区域不同接触阶段的米塞斯应力分布云图和位移分布云图

Fig.7 Nephograms of (a-c) von Mises stress contour plot and (d-f) displacement magnitude contour plot in the local contact region between TA1 titanium strip with 15% deformation and the roll boss in different contact stages: (a, d) initial contact; (b, e) sustained contact; (c, f) contact termination

后续轧制过程中，工作辊在钛带表面滑动，其表面磨痕“凸起微峰”会导致钛带表面产生犁沟（类似于微区划痕），并在犁沟两侧形成突出的黏附结构。图 8 为 TA1 钛带轧制过程中的表面形貌演变机理。随着道次压下率越大，磨痕的凸起微峰对钛带表面的刻划现象越严重，磨痕凸起前端在钛表面产生犁出、压平、黏附作用；而且，磨痕凹槽处充满黏附物后，犁

沟两侧的黏附物增加，造成单位表面的鳞片状凸起数量增多。相反，减少道次压下率，表面的鳞片状凸起数量减少。

改善轧带材表面鳞片状形貌，提高钛板带材表面质量的途径有：① 减小道次压下率；② 适当改善润滑条件；③ 减少后续道次工作辊表面粗糙度，或更换低表面粗糙度的轧辊。

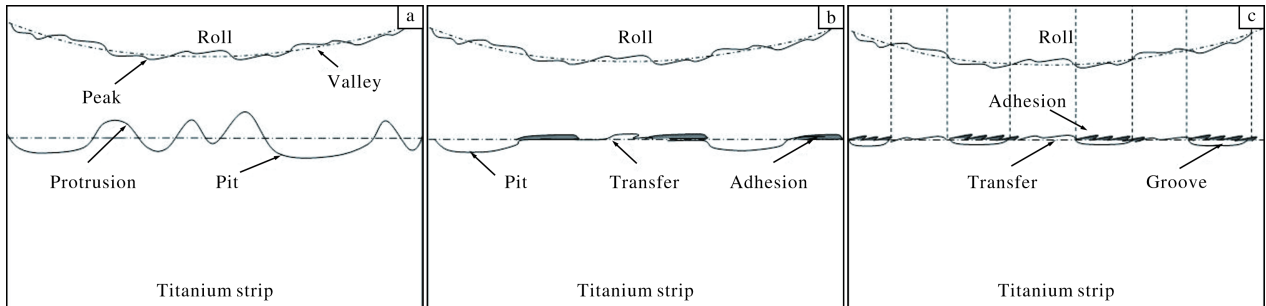


图 8 TA1 钛带轧制过程中的表面形貌演变机理

Fig.8 Evolution mechanism of surface morphologies during TA1 titanium strip rolling process: (a) surface morphology of work roll and shot peened titanium strip; (b) initial pass titanium strip surface pits and adhesive scales; (c) fine pass sub surface transfer, groove, adhesion

3 结 论

(1) TA1 钛带材冷轧时，其表面喷丸形成的凹坑随

着轧制道次的增加逐渐减少，1 道次出现鳞片状形貌，3 道次凹坑大幅减少且有折叠缺陷，5 道次几乎无凹坑，鳞片更明显。多道次冷轧可消除 TA1 钛带表面凹

坑, 但会产生鳞片状形貌。

(2) 轧辊凸台导致 TA1 钛带表面形成“凹陷犁沟”和“凸起微峰”, “凸起微峰”被轧平成鳞片状, 压下量越大折叠越严重。

(3) 减小道次压下率可改善鳞片状形貌。在实际生产中, 改善润滑条件和降低工作辊表面粗糙度也可以改善鳞片状形貌。

参考文献 References

- [1] Zhao Q Y, Sun Q Y, Xin S W, et al. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: a review on melting-forging process[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022, 845: 14326.
- [2] Xu J B, Zhang B W, Qu W T, et al. Advancements and applications of laser surface treatment on titanium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(5): 1296-1309.
- [3] 安仲生, 陈岩, 赵巍, 等. 2023 年中国钛工业发展报告[J]. *钛工业进展*, 2024, 41(2): 41-48.
- [4] 辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(11): 3981-4001.
- [5] 张京. 薄壁焊接钛管用钛带的研制[J]. *现代冶金*, 2012, 40(5): 30-33.
- [6] 安仲生, 赵巍, 淮金. 2024 年中国钛工业发展报告[J]. *钛工业进展*, 2025, 42(2): 40-48.
- [7] Bordin A, Sartori S, Bruschi S, et al. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by additive manufacturing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 4142-4151.
- [8] 李伟, 于辉, 李松松, 等. 基于各向异性冷轧纯钛薄带的屈服行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(9): 3213-3220.
- [9] 许斌, 刘春明, 安成强, 等. 冷轧板的各工序形貌及表面清洁度分析[J]. *表面技术*, 2010, 39(4): 53-54+112.
- [10] 杨利坡, 张海龙, 张永顺. 高端冷轧箔带形状/性能协同测控现状及趋势预测[J]. *金属学报*, 2021, 57(3): 295-308.
- [11] 张智鑫, 樊江昆, 李瑞锋, 等. 钛合金板材制备技术的现状及展望(上)——薄板制备技术[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(10): 22-33.
- [12] Chang L, Zhou C Y, Peng J, et al. Fields-Backofen and a modified Johnson-Cook model for CP-Ti at ambient and intermediate temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 1803-1809.

研究简报

一种兼具轻质高强与宽温超弹性的新型 Ti-Al-Cr 形状记忆合金

面对深空探测、航空航天及超低温工程等领域对材料轻量化、宽温域超弹性与极端温度稳定性的三重需求, 日本东北大学研究团队基于 Ti-Al-Cr 体系热力学设计, 开发出成分为 Ti-20Al-4.75Cr (原子分数, %) 的新型形状记忆合金。

通过电弧熔炼、热轧, 结合多级循环热处理及快速淬火工艺, 再经电火花加工, 成功制备出具有特定取向的厘米级单晶 Ti-20Al-4.75Cr 合金试样。经测试, 该合金展现出优异的综合性能, 其密度低至 4.36 g/cm^3 , 室温临界应力达 800 MPa , 比强度高达 $185 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m/kg}$ 。此外, Ti-20Al-4.75Cr 合金还具备出色的超弹性, 可恢复应变达 7.3%, 与商用镍钛合金相当。其性能核心突破在于实现了 4.2~400 K 的超宽温域完全超弹性恢复, 操作温窗跨度为 396 K, 达到传统镍钛合金的 5 倍。

研究人员利用原位中子衍射技术解析出该新型 Ti-Al-Cr 合金的超弹性源于应力诱导有序 B2 母相(点阵常数 0.322 nm) 向正交 B19 马氏体(点阵常数 $a=0.294 \text{ nm}$, $b=0.490 \text{ nm}$, $c=0.461 \text{ nm}$) 的可逆相变机制; 高分辨扫描电子显微镜(STEM) 观测证实, 母相中存在尺寸约 15 nm 的 B2 有序纳米畴及宽度约 2 nm 的反相边界结构。该合金相变应力的异常温度依赖性对其超宽工作温度窗口起到关键作用, 约 200 K 以上时, 相变应力呈正温度依赖性; 200 K 以下时, 相变应力随温度降低而升高, 此反常现象源于母相剪切模量 C' 的负温度依赖性, 即 4.2 K 时 C' 值较室温条件下提升 22%, 结合晶格非简谐性减弱共同增强母相机械稳定性。

该新型 Ti-Al-Cr 合金在深空探测(适应月球/火星极端温度波动)、生物医学(杨氏模量约 30 GPa , 接近人骨)及液化氢存储(极端低温密封部件)等众多领域具有广阔应用前景, 其 Al、Cr 组分具备成本优势, 存在巨大产业化潜力。此外, 该研究为高性能轻质多功能材料的开发开拓了新的思路。

罗莹、雷征摘译自《Nature》2025, 638