DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2025.5162

基于数字图像相关的 TNM 合金拉伸行为分析

张晨愉[1]，马　彪[1]，王慧琴[1]，陈晓飞[1,2]，李　巍[3]，苏　驰[3]，赵天飞[1,4]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室，陕西 西安 710072；2. 中国石油集团工程材料研究院有限公司石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室，陕西 西安 710077；3. 中国人民解放军 93147 部队；4. 西北工业大学 重庆科创中心，重庆 401135)

摘　要：TNM 合金作为典型的 γ-TiAl 合金，密度较低且比强度高，在航空航天领域的服役潜力巨大，但其室温脆性较大且变形机制复杂，传统拉伸试验难以直观捕捉局部应变的演化规律，制约了其成形工艺优化与应用拓展，因此需要精准表征其变形行为的有效方法。数字图像相关法(digital image correlation, DIC)作为一种新兴技术，具有测量范围广、精度高、非接触等优点，可以直观显示合金在变形过程中的应变分布及位移演变情况，但鲜少用于研究 TNM 合金室温拉伸过程中的应变及位移变化。基于此，为直观显示 TNM 合金在室温拉伸过程中的应变及位移分布行为，本文结合 DIC 设备及其软件 Istra 4D 进行了研究。结果表明，室温拉伸时，TNM 合金的真应力–应变曲线呈现弹性变形和加工硬化阶段，无屈服平台，抗拉强度为 464.35 MPa，断后伸长率为 3.39%；借助 DIC 技术捕捉了 TNM 合金拉伸过程中的应变分布及位移变化，发现试验制备散斑质量良好，位移随时间近似线性增长，前期波动较大，后期趋于平稳。验证了 DIC 在 TNM 合金拉伸变形过程中的适用性，该方法可实现从宏观到微观尺度的全场、非接触变形测量，揭示了传统方法无法观测的微观变形不均匀性、局部化现象及其与微观结构的关联，促进了多尺度、多物理场的原位耦合分析，为理解复杂的变形机制、损伤过程和验证先进材料模型提供了不可或缺的实验依据。

关键词：TNM 合金；数字图像相关法；拉伸行为；力学性能

中图分类号：TG146.2+3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2025)09-0896-06

Analysis of Tensile Behavior of TNM Alloy Based on Digital Image Correlation

ZHANG Chenyu[1], MA Biao[1], WANG Huiqin[1], CHEN Xiaofei[1,2], LI Wei[3], SU Chi[3], ZHAO Tianfei[1,4]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials，CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China; 3. 93147 Troops of the Chinese People's Liberation Army; 4. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: As a representative γ-TiAl alloy, the TNM alloy has a low density and high specific strength, demonstrating significant potential for application in the aerospace industry. However, its pronounced room-temperature brittleness and complex deformation mechanisms pose challenges for conventional tensile testing, which is limited in capturing the evolution of localized strain. This constraint hinders the optimization of its forming processes and broader application. Therefore, there is a pressing need for an effective and precise method to characterize its deformation behavior. Digital image correlation (DIC), an emerging technique, offers advantages such as a broad measurement range, high accuracy, and noncontact operation. This enables visualization of the strain distribution and displacement evolution during deformation. Nevertheless, its application in studying strain and displacement variations in TNM alloys during room-temperature tensile testing remains limited. To address this gap and provide a clear depiction of the strain and displacement distribution behavior of the TNM alloy under room-temperature tension, this study employed DIC equipment and its associated software, Istra 4D. The results indicate that the true stress-strain curve of the TNM alloy during room-temperature tensile testing consists of elastic deformation and work hardening stages, without a distinct yield plateau. The ultimate tensile strength is measured as 464.35 MPa, with a postfracture elongation of 3.39%. Using DIC, the strain distribution and

收稿日期: 2025-07-25

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702602)

作者简介: 张晨愉，2002 年生，硕士生. 研究方向为钛铝合金. Email: zhangcyy@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 赵天飞，1980 年生，副教授. 研究方向为先进材料力学性能表征. Email: tfzhao@nwpu.edu.cn

引用格式: 张晨愉，马彪，王慧琴，陈晓飞，李巍，苏驰，赵天飞. 基于数字图像相关的 TNM 合金拉伸行为分析[J]. 铸造技术，2025, 46(9): 896-901.

ZHANG C Y, MA B, WANG H Q, CHEN X F, LI W, SU C, ZHAO T F. Analysis of tensile behavior of TNM alloy based on digital image correlation[J]. Foundry Technology, 2025, 46(9): 896-901.

中国知网　https://www.cnki.net

displacement changes during the tensile process are successfully captured. The quality of the speckle pattern used in the experiment is found to be satisfactory. The displacement exhibits an approximately linear increase over time, characterized by significant fluctuations in the early stages and a more stable trend in the later stages. This study confirms the applicability of the DIC method in analysing the tensile deformation behavior of TNM alloys. The DIC technique enables full-field, noncontact deformation measurements across macroscopic to microscopic scales, revealing deformation inhomogeneities, localization phenomena, and their correlation with microstructural features that are not detectable via conventional methods. Furthermore, it facilitates in situ, multiscale, and multiphysical field coupled analysis, thereby providing essential experimental data for understanding complex deformation mechanisms and damage progression and for validating advanced material models.

Key words: TNM alloy; digital image correlation; tensile behaviour; mechanical properties

在航空航天、能源动力等高端装备领域中,轻质高温结构材料的性能直接决定了装备的运行效率与服役寿命。TNM 合金作为一种 γ-TiAl 基合金,凭借其低密度、高比强度及优异的高温性能,在航空发动机、涡轮叶片等关键部件上应用潜力巨大[1-2]。然而,TNM 合金室温脆性大、塑性变形能力差,且高温下易出现组织不均匀、裂纹萌生与扩展等问题[3-4],使得锻造、轧制等热加工过程难以精确控制,极大地制约了其成形质量与性能的稳定性[5]。拉伸性能能够反映出材料在拉伸载荷下抵抗变形和断裂的能力,是材料的基本力学性能之一。因此,深入研究 TNM 合金的力学行为,尤其是拉伸性能[6-7],对于优化其加工工艺、提升构件可靠性具有重要意义。

目前,传统拉伸试验大多依赖于测量宏观应变,难以捕捉材料表面的局部变形特征,无法获得全场位移及应变分布信息。而数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术可通过对变形前后物体表面的散斑图像进行匹配分析,利用亚像素级别的位移追踪算法,能够非接触式地获取构件表面的全场位移与应变,具有测量范围广、精度高、操作简便等优势[8-9]。该技术已广泛应用于金属、复合材料等领域的力学性能研究[10-11],为揭示材料的变形机理、损伤演化规律提供了可视化的量化数据[12]。张翼飞等[13]研究了不同拉伸预变形量对 2195 铝锂合金时效后拉伸力学性能的影响,借助 DIC 观察发现增大拉伸预变形量后,拉伸过程中的应变集中现象会提前出现,试样的颈缩稳定性有所降低。邹正平等[14]借助 DIC 研究了 5A02 铝合金管材的胀形实验,建立了管材自由区域的力学模型,并进一步建立了 5A02 铝合金管材的本构方程。彭小龙[15]对Q235B 钢、45 钢和 T8 钢 3 种碳钢进行了拉伸实验,基于 DIC 技术测定了拉伸过程中颈缩处的应变、半径及应力三轴度变化情况。然而,目前有关 DIC 技术的应用主要集中于铝合金、碳素钢等材料[13-16],而在钛铝合金特别是 TNM 合金的拉伸过程中鲜少应用。基于 TNM 合金的重要应用价值及其热加工难点,本文结合 DIC 技术研究 TNM 合金室温拉伸过程的变形与应变规律,探究其宏观力学参数与全场应变分布,为钛铝合金在高端装备领域的应用提供理论基础与实验支撑。

1　实验材料与方法

实验所用材料为 TNM 合金,名义成分为 Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B(原子分数,%),其铸锭的多道次锻造工艺如下:对铸锭进行软包处理,先在铸锭四周均匀涂抹润滑剂,待润滑剂风干后用内含钢丝的保温棉对铸锭进行软包,软包厚度为 8 mm,然后用棉线固定牢固。将压机预热至 600 ℃后,铸锭随炉加热至 1 200 ℃并保温 15 min,取出后再次软包。软包后放回炉中,升温至 1 200 ℃保温 12 min,取出后立即以 1 mm/s 的变形速率沿铸锭轴向镦粗,变形量为初始铸锭长度的 20%(即 24 mm)。再进行软包后放回炉中,随炉加热至 1 300 ℃保温 17 min,取出后立即以 1 mm/s 的变形速率沿铸锭轴向镦粗,变形量为初始铸锭长度的 30%(即 36 mm),然后空冷。为分析锻造对合金组织的影响,用 TESCAN Clara GMH 扫描电子显微镜(SEM)在背散射电子模式下观察试样的显微组织,工作距离 11 mm,加速电压 15 kV,束流 1 nA。从铸锭心部沿锻造轴向切取尺寸为8 mm×8 mm×4 mm 的小方块,经机械打磨后使用司特尔电解抛光腐蚀仪进行电解抛光。电解抛光溶液配比为 60%甲醇 +35%正丁醇 +5%高氯酸(体积分数),电压设定为 25 V,温度为 0~3 ℃,抛光时间为 20 s。

TNM 合金的室温拉伸试验在 DCMT-100/1200 高温真空万能试验机上进行,圆棒状试验的标距段长度为 15 mm,直径为 3 mm,几何尺寸如图 1a 所示。在进行拉伸性能测试前,通过线切割切取圆柱试样后,对圆柱试样进行机加工获得圆棒状拉伸试样,并使用磨床对试样表面进行磨抛。随后用酒精对试样进行超声清洗,以确保试样表面的洁净度,便于进行 DIC 观察。拉伸试验应变速率 0.000 1 s^{-1}、试验温度为室温,进行 3 次拉伸试验,取平均值作为合金在

中国知网　https://www.cnki.net

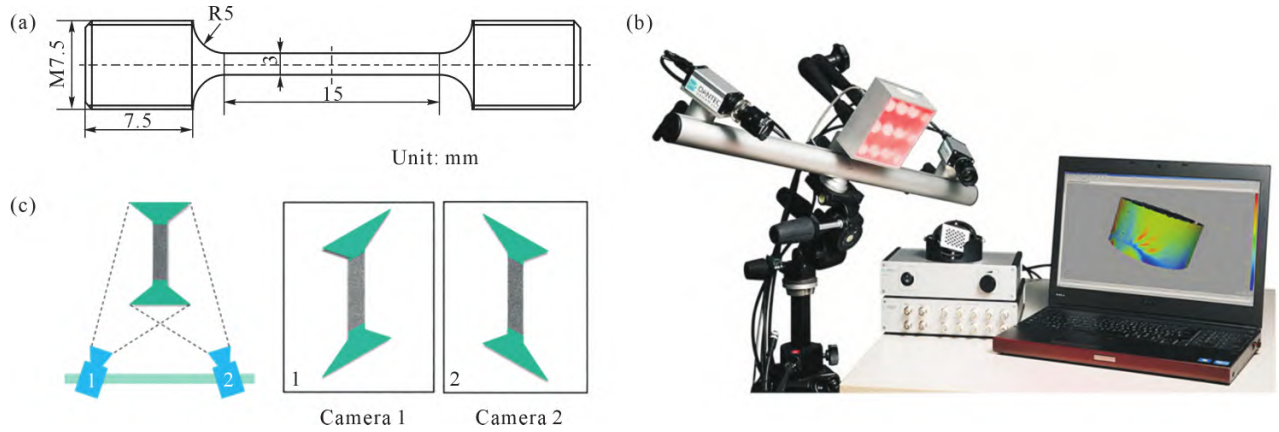


图 1 室温拉伸试验及 DIC 系统：(a) 室温拉伸试样几何尺寸；(b) DIC 系统相机设置；(c) DANTEC/Q-400 三维光学变形测量系统

Fig.1 Room-temperature tensile tests and DIC system: (a) geometric dimensions of the room-temperature tensile sample; (b) camera settings of the DIC system; (c) DANTEC/Q-400 three-dimensional optical deformation measurement system

室温下的力学性能。在拉伸试验过程中，同步采用 DIC 技术对试样的变形和应变进行监测，DANTEC/Q-400 三维光学变形测量系统设置如图 1b 和 c 所示。拉伸试验前对试样进行散斑标记处理，清洁试样表面的污染物后进行喷漆处理。为避免喷漆过程中出现结块现象，将喷漆摇匀后在试样表面均匀喷涂白色哑光漆，通过白色哑光漆给试样打底以保证图案具有高的对比度。等白漆干燥后向试样表面随机喷涂黑色哑光漆，需确保散斑细小均匀，且黑色斑点占比约 50%。喷漆完成后静置 3 min 待散斑风干，形成散斑点图案。在试样室温拉伸的过程中利用高速相机采集表面图像，再借助 DIC 软件 Istra 4D 对图像进行分析，得到全场应变分布、应变演化信息。由于拉伸过程中温度场不均匀、热气流畸变等因素影响图像的采集精度，需要对图像进行预处理，消除采集失真与外界噪声干扰。

2 实验结果及讨论

2.1 锻造前后显微组织分析

实验所用 TNM 合金铸锭的初始组织为全片层组织，如图 2a 和 b 所示，主要由粗大 α_2/γ 片层团和亮白色 β_0 相组成。其中片层团尺寸较大，在100~300 μm 范围内。在片层团内部，γ 相和 α_2 相交替排列，形成规则片层结构，β_0 相主要分布在片层团边界处。粗大的全片层组织使得合金在热加工过程中变形困难，易产生裂纹等缺陷，这也是 TNM 合金热加工难度大的原因之一[17]。

经过上述锻造工艺处理后，沿锻造方向的轴向

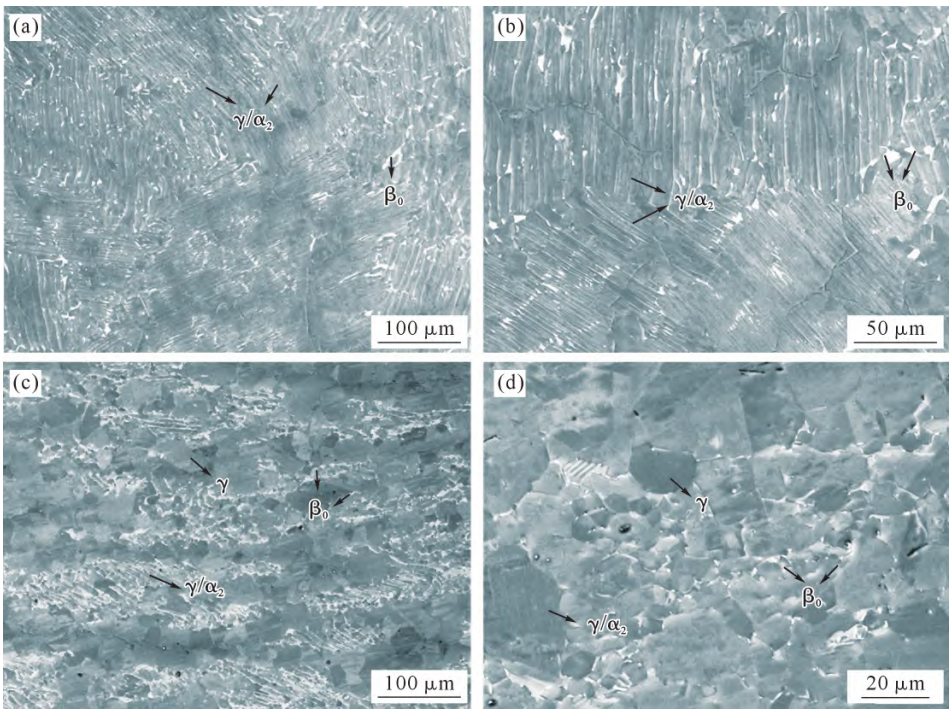


图 2 TNM 合金 SEM 像：(a, b) 锻造前；(c, d) 锻造后

Fig.2 SEM images of the TNM alloy: (a, b) before forging; (c, d) after forging

中国知网 https://www.cnki.net

观察，发现 TNM 合金的显微组织转变为双态组织，如图 2c 和 d 所示，主要由残余片层 α_2/γ 片层团、再结晶等轴 γ 相以及 β_0 相组成。锻造过程中，1 200 和 1 300 ℃的加热温度与变形的共同作用，通过动态再结晶使得原始粗大的 γ/α_2 片层团破碎，促进了等轴 γ 相的生成[17-18]。与锻造前相比，片层团尺寸明显细化；再结晶等轴 γ 相在组织中均匀分布；β_0 相仍主要分布在晶界及片层团边界处，但在锻造过程中发生破碎，尺寸有所减小。

2.2　真应力–应变曲线分析

TNM 合金在 0.000 1 s^{-1} 应变速率下室温拉伸的真应力–应变曲线如图 3 所示，观察到曲线存在弹性和硬化两个阶段，没有屈服平台，出现了明显的加工硬化现象[19-20]。进一步分析拉伸试验数据得到该合金的抗拉强度为 464.35 MPa、断后伸长率为 3.39%。在弹性变形阶段，真应力–应变曲线起始段近似直线，此阶段应力与应变成正比，材料发生弹性变形。在塑性变形与加工硬化阶段，随着应变的增加，曲线逐渐偏离直线，呈现持续上升趋势，表明材料进入了塑性变形阶段，且由于加工硬化的作用，需要不断增大应力才能使材料继续变形。2.1 节中提到，合金锻造过程中发生了动态再结晶，锻后形成了均匀分布的再结晶等轴 γ 相和细化的片层团，在拉伸过程中相互作用产生加工硬化作用，使得 TNM 合金在塑性变形的过程中可抵抗一定程度的形变。

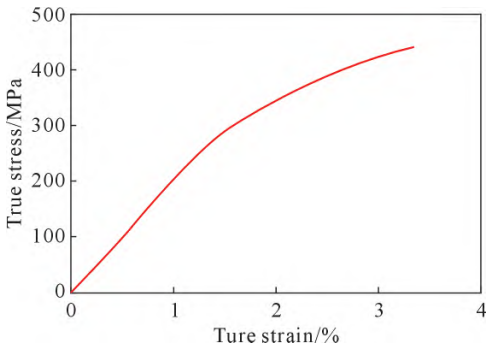


图 3　TNM 合金室温拉伸真应力–应变曲线

Fig.3　True stress-strain curves of the TNM alloy under room-temperature tensile tests

2.3　拉伸过程数字图像相关分析

DIC 技术可以通过摄像机实时拍摄试样拉伸过程中的变形图像，通过与初始未变形图像对比，进而得到全场应变信息，包括全场应变云图及位移的演化曲线等信息。在拉伸过程中，由于试样周围温度场的不均匀分布、热气流的畸变和其他外部因素的影响会对测量过程中的图像采集产生不利影响，导致实际位移和变形值的不准确。因此需要对图像进行预处理后再分析，预处理的目的是消除采集过程中图像失真以及一些由外界因素引起的噪声，提高位移与应变的计算精度[21-22]。

借助 DIC 软件 Istra 4D 对 TNM 合金拉伸试验得到的云图进行预处理，得到拉伸试样图、应变分布云图和应变及位移的测量结果。拉伸试样照片如图 4a 和 b 所示，发现试样沿拉伸方向(x 方向)被拉长，标距段中部出现轻微颈缩趋势。拉伸前后试样表面散斑分布均匀，黑色斑点与白色基底对比度高，未出现因拉伸变形导致的散斑脱落、模糊或团聚现象，表明散斑喷涂质量优异，与试样表面贴合紧密。通过 DIC 设备得到的 x 方向云图可以直接观察试样拉伸试样的应变分布，如图 4c 所示，与所被测试样下端固定、仅受到向上拉伸力的实际情况相吻合。利用软件在试样拉伸云图上划定 Line1(沿标距段轴向的直线)，得到的位移–时间曲线(图 5a)显示，位移随时间呈近似线性增长趋势，前期弹性变形阶段斜率较为稳定，进入塑性变形阶段后斜率略有下降，但整体符合预设的加载速率，说明拉伸试验过程控制稳定。图

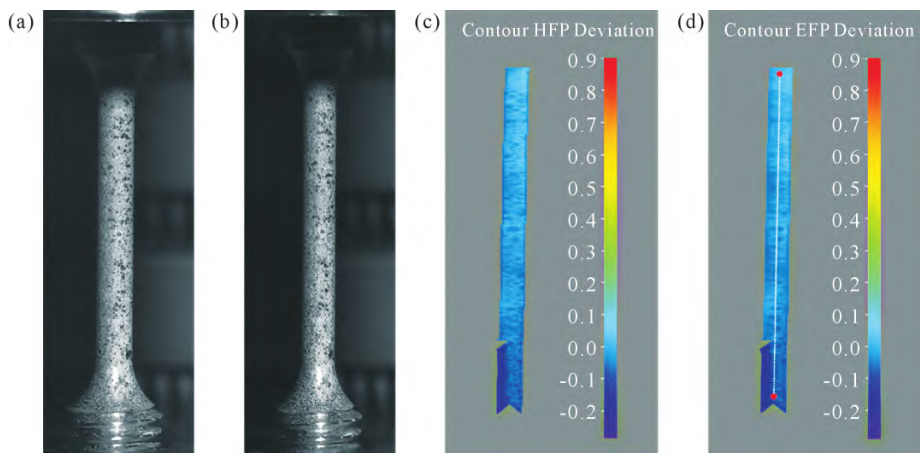


图 4　拉伸 DIC 分析：(a) 试样拉伸前；(b) 试样拉伸后；(c) 试样应变分布云图；(d) Line1

Fig.4　DIC analysis for tensile testing: (a) before sample stretching; (b) after sample stretching; (c) contour plot of the specimen strain distribution; (d) Line 1

中国知网　https://www.cnki.net

5b 和 c 分别为拉伸前期及后期试样的位移变化曲线，可知在拉伸前期，位移曲线波动大，随着拉伸过程逐渐进行，试样上的位移分布逐渐稳定，位移分布曲线逐渐趋于平稳，表明此时材料已经进入稳定塑性变形阶段，应力–应变关系趋于稳定。

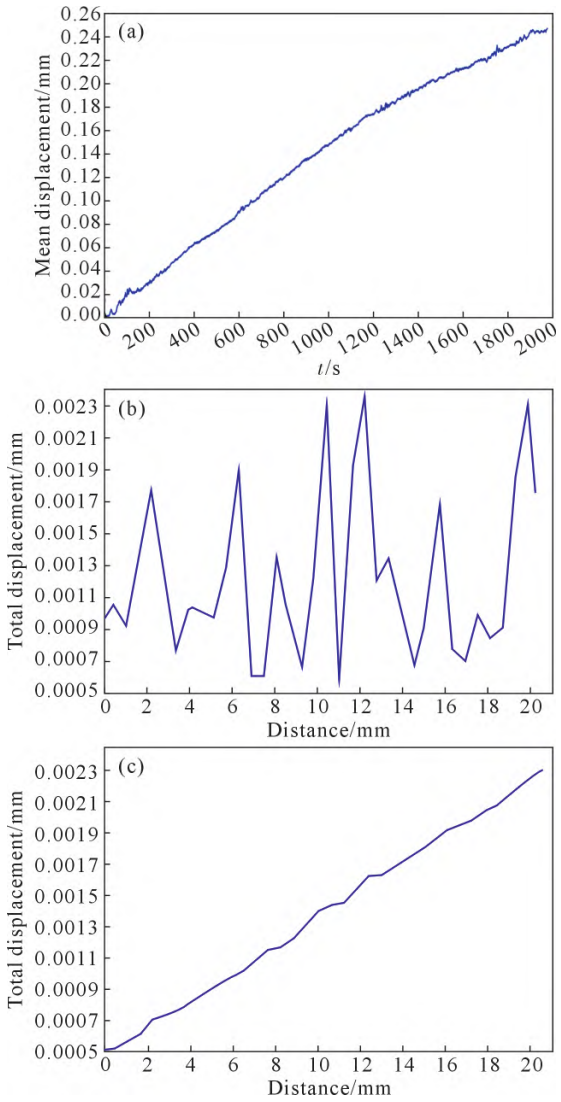


图 5 DIC 分析曲线：(a) 位移–时间曲线；(b) 拉伸初期位移曲线；(c) 拉伸末期位移曲线

Fig.5 DIC curves: (a) displacement-time curve; (b) initial displacement curve during stretching; (c) displacement curve at the final stretching stage

3 结论

(1)经多道次锻造后，TNM 合金发生了动态再结晶，显微组织由全片层组织转变为双态组织，片层团尺寸显著细化且等轴 γ 相均匀分布，β_0 相破碎并分散于晶界，改善了合金的组织均匀性，为合金提供了一定的塑性变形基础。

(2)室温拉伸时 TNM 合金的真应力–应变曲线表现出弹性变形与加工硬化特征，无屈服平台，其抗拉强度为 464.35 MPa、断后伸长率为 3.39%。

(3)通过高质量散斑图像的采集与分析，精准捕捉到 INM 合金室温拉伸过程中的全场应变分布，观察到试样标距段中部有轻微颈缩趋势；位移随时间呈近似线性增长，前期因弹性变形阶段的不稳定表现出较大波动，后期进入稳定塑性变形阶段后趋于平稳。

参考文献：

[1] LORIA E A. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials[J]. Intermetallics, 2000, 8(9-11): 1339-1345.

[2] 卫贝贝，马彪，陈晓飞，张翔，唐斌. Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B 合金多道次热轧后冷却速率对其组织演化及性能的影响[J]. 铸造技术，2025, 46(4): 307-315.
WEI B B, MA B, CHEN X F, ZHANG X, TANG B. Effect of the cooling rate on the microstructure evolution and properties of Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B alloy after multiple pass hot rolling [J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 307-315.

[3] ZHOU Z C, LIU R C, SHEN Y Y, LIU Y, WANG P, CUI Y Y, YANG R. Microstructural evolution and embrittlement of a β-solidifying γ-TiAl alloy during exposure at 700 ℃[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 852: 143704.

[4] KANG X, PU Z N, ZHENG M M, WU J P, XIANG J, WU F F, LIU C Z. Optimization of microstructure and high-temperature mechanical properties of Ti4822/Ti_2AlC composites through multiple solution-aging treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176862.

[5] QIANG F M, KOU H C, WANG L L, LI J S. β_o precipitation in α_2 lamellae of the β-solidifying multiple-phase γ-TiAl alloy[J]. Materials Characterization, 2020, 167: 110474.

[6] 邵启航，楚玉东，陈晓飞，卫贝贝，马彪，唐斌. Ti-43Al-0.5Re-*x*Cr 合金高温变形过程的动态再结晶行为[J]. 铸造技术，2025, 46(4): 316-324.
SHAO Q H, CHU Y D, CHEN X F, WEI B B, MA B, TANG B, Dynamic recrystallization behavior during thermal deformation of Ti-43Al-0.5Re-*x*Cr alloy [J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 316-324.

[7] CUI N, WU Q Q, YAN Z Y, ZHOU H T, WANG X P. The microstructural evolution, tensile properties, and phase hardness of a TiAl alloy with a high content of the β phase[J]. Materials, 2019, 12(17): 2757.

[8] 朱飞鹏，孔德阳，龚琰，白鹏翔，雷冬，康新. 基于三维 DIC 方法的高强钢拉伸力学性能测定[J]. 力学季刊，2018, 39(2): 359-367.
ZHU F P, KONG D Y, GONG D, BAI P X, LEI D, KANG X. The measurement of tensile mechanical properties of high-strength steel using three-dimensional digital image correlation[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2018, 39(2): 359-367.

[9] JIN T L, LEE S H, GOO N S. Thermal stress measurement of a double ring structure using digital image correlation method [J]. Experimental Techniques, 2016, 40: 195-205.

[10] MURRAY C A, HOULT N A, TAKE W A. Dynamic measurements using digital image correlation [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2017, 17(1): 41-52.

中国知网 https://www.cnki.net

[11] FRANKOVSKÝP, DELYOVÁ I, SIVÁK P, BOCKO J, ŽIVČÁK J, KICKO M. Modal analysis using digital image correlation technique[J]. Materials, 2022, 15(6): 5658.

[12] LUO X Z, ZHANG S M, LI A D, YANG X C, LIANG Z H. Steel rebar effect on tensile and cracking behavior of UHPFRC based on direct tensile tests and digital image correlation[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 137: 104940.

[13] **张翼飞，叶凌英，董宇，邹国童，李俊，杨献文. 预变形对** 2195 **铝锂合金拉伸力学性能的影响**[J]. **中国有色金属学报**，2024, 34(3): 725-738.
ZHANG Y F, YE L Y, DONG Y, ZOU G T, LI J, YANG X W. Effect of pre-strain on tensile mechanical properties of 2195 aluminum-lithium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(3): 725-738.

[14] **邹正平，张猛，郎利辉. 基于三维数字图像相关法的管材胀形试验**[J]. **航空学报**，2022, 43(12): 539-544.
ZOU Z P, ZHANG M, LANG L H. Tube bulging test based on 3D digital image correlation method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(12): 539-544.

[15] **彭小龙. 三维数字图像相关法在碳钢拉伸中的应用及数值模拟研究**[D]. **抚州：东华理工大学**，2022.
PENG X L. Application and numerical simulation of 3D digital image correlation method in carbon steel stretching[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2022.

[16] **戴云彤，陈振宁，朱飞鹏，何小元. 小尺寸低碳钢试件吕德斯效应的三维数字图像相关测量**[J]. **力学学报**，2015, 47(1): 119-126.
DAI Y T, CHEN Z N, ZHU F P, HE X Y. Measurement of Lüders band in small size low carbon steel specimen by 3D digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(1): 119-126.

[17] CHEN X F, TANG B, WEI B B, CAO X C, PAN X Y, WANG H Q, ZHENG G M, LI J S. Study on recrystallization and phase transformation of Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B alloy during the inter-pass annealing[J]. Intermetallics, 2025, 179: 108681.

[18] CHEN X F, TANG B, WEI B B, XU W X, MA B, DAI J H, ZHENG G M, LI J S. Interaction between dynamic recrystallization and phase transformation of Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B alloy during hot deformation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 214: 130-142.

[19] YANG G, XU X J, HAO G J, ZHAI Y W, WANG H Z, LIANG Y F, LIN J P. Microstructure evolution, deformation behavior and processing performance of TNM TiAl alloy[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 5530-5551.

[20] ZHANG S, LIANG Y L, XIA Q F, QU M G. Study on tensile deformation behavior of TC21 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 1581-1590.

[21] **段海涛，陈志新，张哲，孙景涛，刘雨超. 基于三维数字图像相关法研究表面粗糙度和缺口对** TC4 **钛合金拉伸性能的影响**[J]. **机械工程材料**，2025, 49(4): 34-39.
DUAN H T, CHEN Z X, ZHANG Z, SUN J T, LIU Y C. Effect of surface roughness and notch on tensile properties of TC4 titanium alloy based on three dimensional digital image correlation method [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2025, 49(4): 34-39.

[22] **吴琼，何斌策，张兴振. 基于数字图像相关技术的大尺寸叶片动态全场应变测量**[J]. **理化检验–物理分册**，2025, 61(2): 26-30.
WU Q, HE B C, ZHANG X Z, Dynamic full field strain measurement for large-sized blades based on digital image correlation technology[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing , 2025, 61(2): 26-30.

(责任编辑：杨浩雪)

中国知网　https://www.cnki.net