

激光冲击强化 TC4 钛合金强化层 弹塑性本构参数反演分析

王淑娜, 伏培林, 李嘉伟, 张旭, 阚前华*

(西南交通大学 力学与航空航天学院 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 611756)

摘要: **目的** 获取 TC4 钛合金激光冲击强化层的弹塑性本构模型参数, 结合纳米压痕试验和有限元模拟技术, 进行激光冲击强化 TC4 钛合金的材料参数反演计算。**方法** 首先, 在 TC4 钛合金试样侧面沿强化层深度方向进行纳米压痕测试, 获得距表面不同距离处的载荷-压入深度曲线。进而, 基于幂律应变硬化模型, 通过无量纲方程和有限元模拟反演得到激光冲击强化 TC4 钛合金梯度强化层的弹塑性参数。最后, 将反演获得的弹塑性本构模型材料参数用于有限元模拟, 将模拟结果与试验结果进行对比, 验证参数反演结果的合理性。**结果** 强化层表面的弹性模量和纳米硬度较母材分别提高了 11% 和 30%, 强化层内的应变硬化指数和屈服强度沿深度方向分别递增和递减。模拟的载荷-压入深度曲线与试验曲线吻合较好, 最大压入载荷、弹性模量和纳米硬度的模拟误差分别小于 1%、7% 和 3%, 证实了参数反演结果的合理性。**结论** 通过无量纲方程反演算法得到的强化层本构参数有较强的可信度。激光冲击强化可有效提升 TC4 钛合金的表面力学性能, 强化层的本构参数呈梯度分布, 表面的抗塑性变形能力大幅提升。

关键词: TC4 钛合金; 激光冲击强化; 纳米压痕; 无量纲分析; 反演分析; 有限元模拟

中图分类号: TG146.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)10-0411-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.10.037

Reverse Analysis of Elasto-plastic Constitutive Parameters of Strengthening Layer for Laser Shock Processing TC4 Titanium Alloys

WANG Shu-na, FU Pei-lin, LI Jia-wei, ZHANG Xu, KAN Qian-hua*

(Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

ABSTRACT: Laser shock processing (LSP) can form a strengthening layer with a gradient structure on the surface of parts, and thus improves the fatigue life. It is of great significance to obtain the elasto-plastic parameters of TC4 titanium alloy after LSP for the fatigue life prediction. However, there are few reports on the determination of elasto-plastic parameters of LSP TC4 titanium alloy. The reverse algorithm combining the nano-indentation experiments with finite element simulation is an effective method to obtain the constitutive parameters of the thin strengthening layer. Therefore, employing the nano-indentation experiments and finite element simulation, the reverse analysis of the LSP TC4 titanium alloy was conducted to determine the

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2023-03-10

Received: 2022-09-02; Revised: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (12072295, 12192214, 11872321)

Fund: National Natural Science Foundation of China (12072295, 12192214, 11872321)

引文格式: 王淑娜, 伏培林, 李嘉伟, 等. 激光冲击强化 TC4 钛合金强化层弹塑性本构参数反演分析[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 411-421.
WANG Shu-na, FU Pei-lin, LI Jia-wei, et al. Reverse Analysis of Elasto-plastic Constitutive Parameters of Strengthening Layer for Laser Shock Processing TC4 Titanium Alloys[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 411-421.

*通信作者 (Corresponding author)

elasto-plastic parameters. First, the nano-indentation experiments of the LSP TC4 titanium alloy specimen were carried out based on the Nano indenter G200 nano-indentation experimental apparatus with the Berkovich diamond indenter, and the indentation depth of 1 000 nm was set by the displacement-controlled method. Then the nano-indentation experiments were carried out on a single side of specimen along the depth direction of the strengthening layer, and the corresponding load-displacement curves at different distances from the surface were obtained. Subsequently, the distributions of elastic modulus and nano-hardness along the depth direction of the strengthening layer were obtained after using the Oliver-Pharr method to determine the unloading stiffness and the reduced modulus from the unloading curves. Then, following the power-law strain hardening assumption, the yield stress and strain hardening index of the surface strengthening layer were determined by numerically solving the dimensionless equations of the representative stress, the ratio of plastic work to total work, and the ratio of residual depth to pressing depth, respectively. Therefore, the elasto-plastic parameters of the surface strengthening layer of LSP TC4 titanium alloy were obtained. Finally, the elasto-plastic parameters obtained by the reverse analysis were introduced to a two-dimensional axisymmetric nano-indentation finite element model. The effectiveness of the reverse analysis was verified by comparing the simulated results with the corresponding experimental results, which took into account the load-displacement curves as well as the variations of elastic modulus and nano-hardness with the distance from the surface. The obtained results showed that the elastic modulus, nano-hardness, yield stress and hardening index possessed a varying distribution along the thickness direction of the strengthening layer (about 300 μm). The surface elastic modulus, nano-hardness and yield stress of the strengthening layer reached 121.2 GPa, 5.0 GPa and 1 396.4 MPa, which were 11%, 30% and 55% higher than that of the substrate, respectively. However, the strain hardening index increased gradually along the depth direction, and the index at the substrate and the surface of the strengthening layer were 0.252 and 0.167, respectively. Additionally, the simulated load-displacement curves agreed with the experimental curves well, and the relative errors of the maximum load, elastic modulus and nano-hardness were less than 1%, 7% and 3%, respectively, demonstrating the effectiveness of the reverse analysis. The calculated results could be great helpful to the fatigue life prediction and the further optimization of LSP process parameters.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; laser shock processing; nano-indentation; dimensionless analysis; reverse analysis; finite element simulation

TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 因具有比强度高、耐热性高、耐腐蚀性好、密度小等特点而广泛应用于船舶、航空航天、车辆工程、生物医学等^[1-6]领域。在服役环境中, TC4 钛合金部件通常不可避免地出现凹坑、缺口等表面损伤。由于 TC4 钛合金对表面损伤非常敏感^[7], 损伤位置极易出现疲劳裂纹的迅速扩展, 甚至导致钛合金部件的局部断裂, 从而严重影响了整个部件的服役可靠性与安全性。因此, 实际服役的钛合金部件往往需要进行表面强化处理, 以提高表面的疲劳性能。激光冲击强化 (Laser Shock Processing, LSP) 利用激光所诱导等离子轰击波的冲击效应, 使目标表面材料发生超高应变率塑性变形, 是一种典型的表面强化技术。与喷丸等传统强化技术相比, LSP 具有强化层更深、非接触、无热影响区、可控性强和绿色环保等显著优点^[8-9], 已被成功应用于航空发动机叶片表面强化等领域。LSP 造成大幅残余压应力分布, 形成高密度位错和细晶组织, 从而改善钛合金部件的力学性能^[10]。同时, LSP 强化层内微观组织的梯度分布, 也会导致硬度、弹性模量等材料力学参数沿强化层深度方向的不均匀分布^[11]。强化层的本构参数是评价强化层力学性能的重要指标之一, 同时也是开展 LSP TC4 钛合金部件在服役工况下的力学响应模拟、寿命

预测与性能改善机理分析的重要前提之一, 因此有必要进行强化层梯度结构的本构参数的研究。

表面 LSP 强化层很薄, 其厚度仅为几十到几百微米, 使用传统的拉伸和压缩试验测量方法通常难以获取强化层的力学性能。因此, 如何获取表面微纳米梯度结构层的应力-应变关系, 并对其局部变形行为进行表征, 已成为表面强化层力学性能研究的关键问题之一。目前, 表面强化层的常见研究手段主要为纳米压痕试验和有限元模拟。郝梦飞^[12]结合剥层薄片拉伸试验与压痕反演分析方法对 18CrNiMn7-6 合金钢表面变质层的弹塑性参数进行了研究, 结合有限元模拟得到了变质层的材料参数。基于微压痕试验和有限元模拟, 许杨剑等^[13]提出了将遗传算法和响应面插值的反演算法相结合的方法, 该方法兼具高精度、高效率的优点, 并且对 $\text{ZrO}_2\text{-NiCrAlY}$ 功能梯度材料的本构模型参数进行了识别分析。基于纳米压痕试验, Ginnakopoulos^[14]研究了塑性梯度材料在圆锥压头作用下的纳米压痕载荷-位移响应, 总结了塑性参数与载荷-位移曲线间的关系。Yuan 等^[15]对表面塑性梯度层的球形压痕接触响应进行了综合的参数研究, 深入讨论了名义压入深度、名义梯度层深度和屈服强度梯度参数对接触响应的影响。Branch 等^[16-17]通过纳米压

痕试验和有限元模拟获得了 M50NiL 不锈钢表面硬化层的本构参数, 并利用沿深度变化的显微硬度、特征应变以及 Gao 等^[18]所建立的硬度与屈服强度间的映射模型, 预测了塑性梯度材料的应力-应变响应。

综上所述, 虽然针对功能梯度材料、表面硬化钢材料等材料的压痕响应及参数反演问题已经展开了大量研究, 但 LSP TC4 钛合金弹塑性本构参数反演分析的相关工作还鲜见报道。TC4 钛合金是航空发动机叶片的一类典型制造材料, 而 LSP 技术也已经被成功用于航空发动机钛合金叶片的表面强化处理, 获取 TC4 钛合金在 LSP 后的弹塑性本构参数, 对于叶片的疲劳寿命预测具有重要意义。因此, 本文拟开展 LSP TC4 钛合金的本构材料参数反演分析。首先沿试样激光强化方向进行纳米压痕测试, 获得载荷-位移曲线以及弹性模量和纳米硬度的梯度分布。然后, 采用无量纲方程并结合有限元模拟迭代获取材料的塑性参数, 得到距表面不同距离处的屈服应力和应变硬化指数, 进而得到表面强化层内部材料不同深度处的应力-应变关系。最后, 将反演确定的本构参数用于表面强化层压痕试验的有限元模型, 验证反演分析结果的可靠性。

1 纳米压痕试验及结果

1.1 试验方法

试验材料为 LSP TC4 钛合金, LSP 参数: 冲击能量平顶分布, 激光能量为 4 J, 脉宽为 20 ns, 光斑直径为 2.4 mm, 功率密度为 5.26 GW/cm², 冲击 1 次, 搭接率为 50%。LSP TC4 钛合金试样尺寸如图 1a 所示, 其中红色虚线框为冲击区域, xy 平面为强化区域表面, 激光冲击强化光斑的行进轨迹如图 1b 所示。通过电火花线切割技术 (WEDM) 截取 LSP TC4 钛合金试样的强化区域, 如图 1c 所示, 获得 9 mm×4 mm×2 mm 的纳米压痕试样, xz 平面为试样的截面。根据纳米压痕试验制样要求, 首先需对表面进行打磨抛光处理, 直至到达镜面光洁程度, 以便消除表面粗

糙度对试验结果的影响。接着将试样放置到酒精中使用超声波清洗机超声 15 min, 以清洗残留的污渍, 使用吹风机烘干表面, 保证试样表面整洁、干燥。压痕试验采用 Nano indenter G200 型纳米压痕仪。

LSP 后钛合金试样的纳米硬度本质上是呈空间场分布, 不仅会沿深度方向梯度变化, 还会因压痕点横向位置 (例如光斑区域中心与搭接区域处) 的差异而不同。为了比较光斑区域中心与搭接区域处的纳米硬度差异, 需要在多个光斑区域的中心与搭接位置进行压痕试验, 对应的试验成本较为高昂。在实际测量 LSP 后材料的硬度分布时, 经常只考虑其沿深度方向的分布^[19-21]。此外, 本研究的核心目的在于提供 LSP TC4 钛合金强化层弹塑性本构参数的一种反演策略, 而非比较不同横向位置下的纳米硬度差异。因此, 为了简化讨论, 相关的压痕试验均在给定横向位置处的横截面上开展。

纳米压痕试验采用 Berkovich 金刚石三棱锥形压头, 棱面和棱边与中心线的夹角分别为 65.3° 和 77.05°。试验过程中, 设置纳米压痕仪的位移分辨率为 0.01 nm, 加载应变速率为 0.05 s⁻¹。在试样侧面沿强化层深度方向设置压入点, 进行位移控制的压入测试。其中, 为了尽可能减小试样表面粗糙度对试验结果不确定度的影响, 压入深度应大于 20 倍的粗糙度, 以此可保证受粗糙度的影响小于 5%, 因此设置压深为 1 000 nm。当压入深度大于 100 nm 时, 可忽略尺寸效应的影响^[22]。同时, 为了避免自由边界以及相邻试验点之间的应力场对压痕结果的影响, 试样边界与试验点的距离不小于压入深度的 10 倍, 相邻试验点位置之间的距离也应在最大压深的 20 倍以上^[22]。因此, 从试样边界至中部, 分别距表面距离 140、160、240、300、360、540、600、720、900 μm 处设置压痕位置, 如图 1d 中三角符号所示。

1.2 试验结果

由纳米压痕试验得到的距表面不同距离处的载荷-位移曲线如图 2 所示。可以看出, 距表面不同距

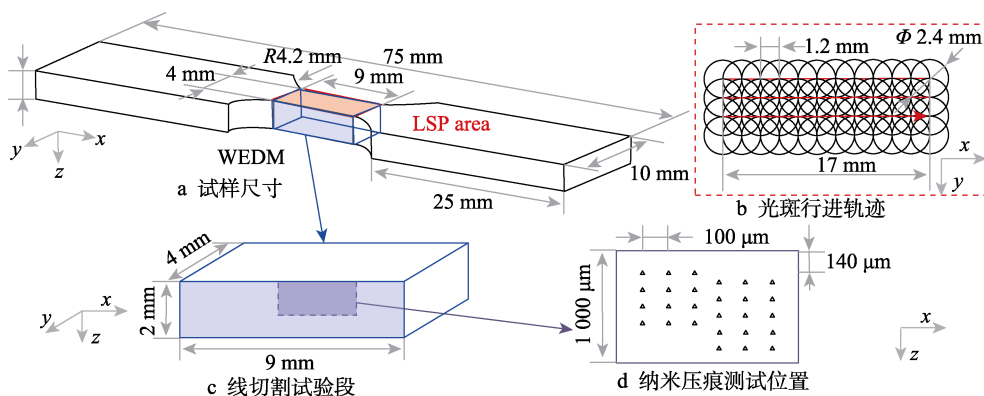


图 1 试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen: a) size of specimen; b) laser shock path; c) specimen for WEDM; d) nano-indentation test positions

离处的载荷-位移曲线呈梯度分布。在压入深度相同时,施加的最大载荷随距表面距离的增大而减小。这是由于经 LSP 处理后,表面区域形成了梯度强化层。随着距表面距离的增大,强化层内材料的晶粒尺寸逐渐增大,位错密度变低,对应的弹性模量和硬度降低,从而材料抵抗变形能力更弱,压入深度相同时所需要的载荷越小^[23]。距表面不同距离处的弹性模量与纳米硬度分布如图 3 所示。弹性模量和纳米硬度沿深度方向的相对误差见表 1。

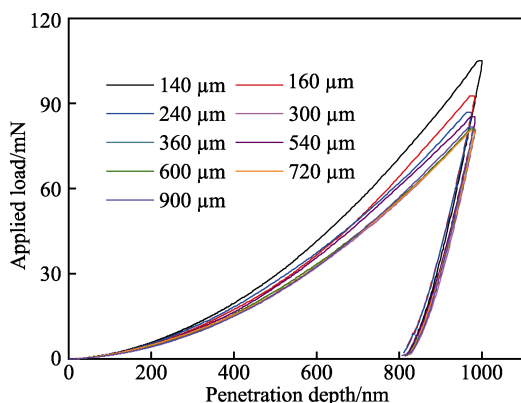
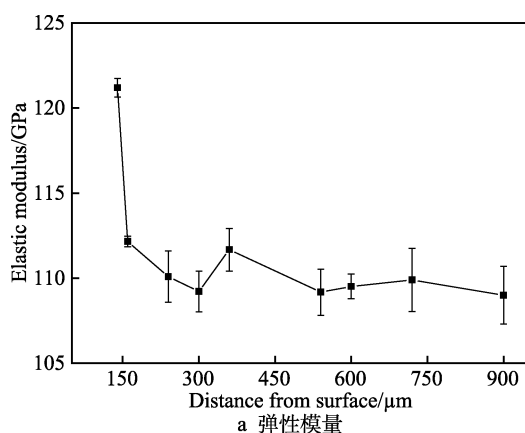
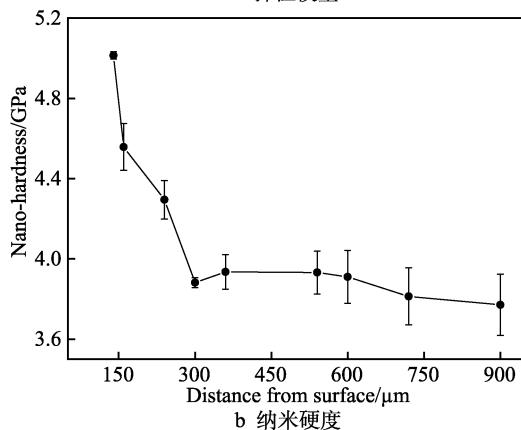


图 2 距表面不同距离处的载荷-位移曲线
Fig.2 Load-displacement curves at different distances from the surface



a 弹性模量



b 纳米硬度

图 3 弹性模量与纳米硬度沿深度的分布
Fig.3 Distributions of elastic modulus and nano-hardness along the distance from the surface: a) elastic modulus; b) nano-hardness

表 1 弹性模量和纳米硬度沿深度方向的相对误差

Tab.1 Relative errors of elastic modulus and nano-hardness along the distance from the surface %

Distances from the surface/ μm	Elastic modulus	Nano-hardness
140	0.91	0.73
160	0.55	5.13
240	2.74	4.47
300	2.18	1.29
>300 (matrix)	3.14	8.09

由图 3 可知, LSP 处理后 TC4 钛合金试样的弹性模量和纳米硬度从表面至 300 μm 深度处, 均随距表面距离的增大而减小。当深度超过 300 μm 后, 纳米硬度趋于稳定, 因此可以认为 LSP 形成的强化层厚度约为 300 μm 。文献[24-25]也得到类似的结果。强化层表面的弹性模量和纳米硬度分别为 121.2 GPa 和 5.0 GPa, 较基体分别提高了约 11% 和 30%。基体的弹性模量和纳米硬度测量值存在波动, 可能的原因之一是压痕试验中并没有区别钛合金 α 和 β 相的性能差异。TC4 钛合金为双相合金, 不同组织的力学参数存在明显差异^[26]。由于 TC4 钛合金的微观组织分布比较复杂, 无法保证压头在压入过程中始终与同一种相组织进行接触。因此, 在纳米压痕试验中, 并没有对不同组织的试验结果加以区分, 而是统一做了平均处理, 对应的测量值波动不可避免。最后得到弹性模量和纳米硬度的相对误差分别在 4% 和 9% 内。

2 表面强化层材料参数反演分析

2.1 材料本构模型

本文的研究对象为 LSP 后的 TC4 钛合金, 并仅对其在准静态加载工况下的力学性能进行反演分析。因此, 所使用的本构模型并非考虑率效应的 J-C 本构模型, 而是率无关的幂律应变硬化模型。其应力-应变关系为^[17]:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ R\varepsilon^n, \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_y = E\varepsilon_y = R\varepsilon_y^n \quad (2)$$

式中: R 为硬化系数; n 为应变硬化指数; σ 为应力; ε 为总应变; σ_y 为名义屈服应力; ε_y 为与之对应的屈服应变。

材料在屈服之后, 总应变 ε 由初始屈服应变 ε_y 和塑性应变 ε_p 两部分组成:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_p \quad (3)$$

由此可以将式 (1) 中的塑性段表示为:

$$\sigma = R\varepsilon^n = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y^n} (\varepsilon_y + \varepsilon_p)^n = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_p \right)^n \quad (4)$$

最终的应力-应变关系确定为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_p \right)^n, \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (5)$$

根据上述假设, 金属材料的线弹-幂律强化本构模型可由弹性模量 E 、屈服应力 σ_y 和应变硬化指数 n 确定^[27]。

2.2 纳米压痕有限元模型

使用 ABAQUS 有限元软件的 Standard 模块进行纳米压痕响应的模拟计算。为了保证计算精度的前提下提高计算效率, 可以对有限元模型进行如下简化。首先, 金刚石压头的弹性模量 (1 140 GPa) 要远高于钛合金, 可以忽略在接触过程中产生的变形量, 因此将其简化为刚体。试样表面经打磨后变得十分光滑, 从而可忽略压头与试样间的摩擦效应。三棱锥金刚石压头相对于试样尺寸十分微小, 可近似于压头与半无限大体的接触, 而且压头类型为对称的三棱锥状, 所引起的应力及位移场具有对称性。鉴于以上原因, 将实际的压痕过程简化为半角为 70.3° ^[28] 的刚性圆锥形压头与光滑半无限大体的轴对称接触模型, 如图 4 所示。设置压头为解析刚体, 模型为尺寸 $100 \mu\text{m}$ 的正方形, 相对于压入深度 $1 \mu\text{m}$ 可认为是半无限大体。在模型底面施加固定约束, 模型对称边界施加对称约束, 在刚体压头上设置的参考点处施加位移载荷, 单调加载至最大位移后, 无峰值保持时间, 随即进行单调卸载, 直至压头完全脱离试样。采用 CAX4 轴对称单元对有限元模型进行网格离散, 共计 25 724

个单元。同时, 对压入接触区域进行网格细化, 而较远区域则使用大尺寸网格, 以提高计算效率。纳米压痕响应过程中不同阶段的塑性应变云图与 Von Mises 应力云图分别如图 5 和图 6 所示。

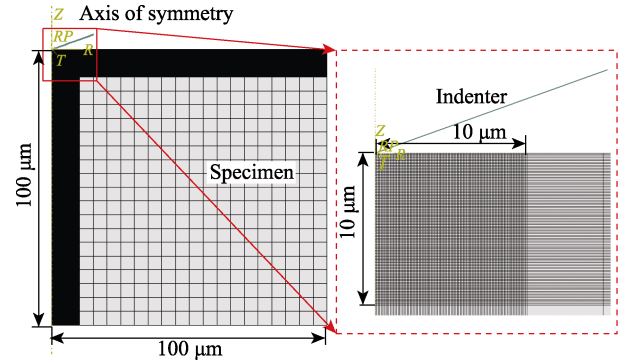


图 4 纳米压痕二维有限元模型
Fig.4 Two-dimensional finite element model of nano-indentation

由图 5 和图 6 可知, 随着压入载荷的增大, 压头与试样接触部分的塑性应变和应力逐渐增大, 在最大载荷处达到最大值。随着压头的退出, 先前压头压入区域发生弹性恢复。当压头完全脱离试样后, 试样表面存在不可恢复的塑性变形。

为了验证反演计算模型的合理性, 对文献[29]中优质碳素结构钢 (AISI 1010) 的载荷-位移试验曲线进行模拟, 如图 7 所示。可以发现, 二维轴对称模型和三维模型的模拟结果近乎完全重合, 并与试验结果符合得较好, 验证了所使用二维轴对称计算模型的合理性。

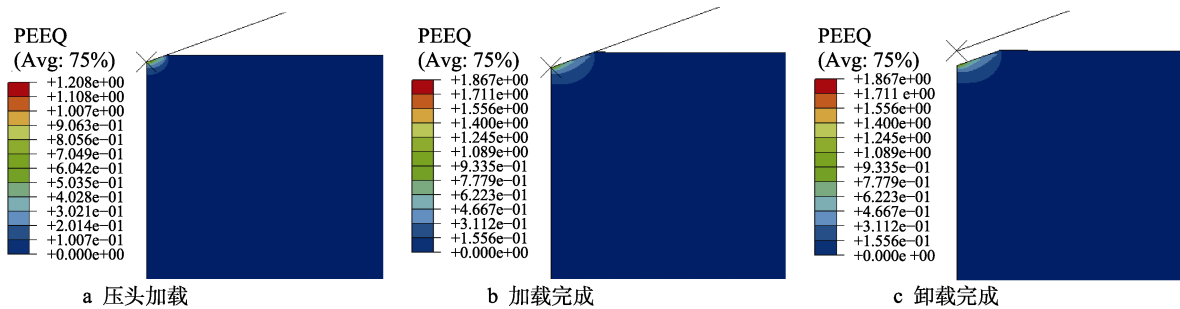


图 5 不同阶段的等效塑性应变分布

Fig.5 Equivalent plastic strain distributions at different moments: a) initially loading; b) fully loading; c) fully unloading

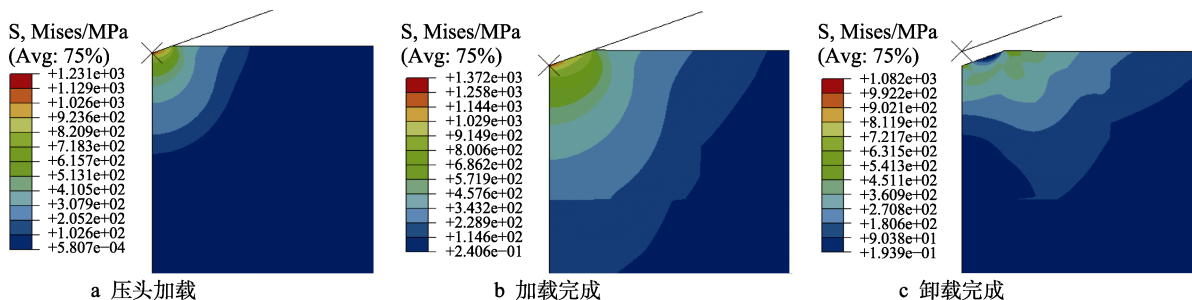


图 6 不同阶段的 Von Mises 应力分布

Fig.6 Von Mises stress distributions at different moments: a) initially loading; b) fully loading; c) fully unloading

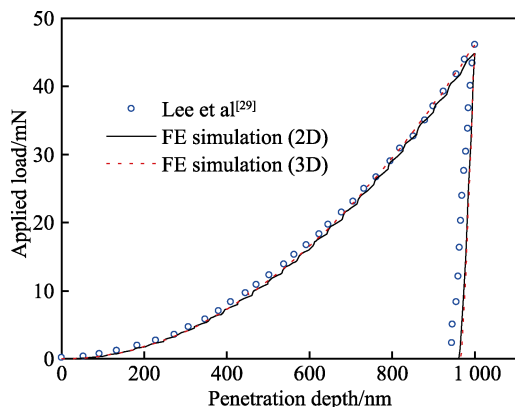


图7 AISI 1010 钢压痕响应的
模拟结果与试验结果的比较

Fig.7 Comparison of indentation response of
AISI 1010 steel between the experimental
result and FE simulation result

2.3 反演分析算法

李莉佳^[26]针对 TC4 钛合金进行了无残余应力以及不同残余应力水平下的微观纳米压痕测试,发现残余应力对 TC4 钛合金载荷-位移曲线的影响较为有限,且会受到材料组分的影响。其中, α 相在不同残余应力水平下的测试曲线基本重合,而 β 相在不同残余应力水平下的载荷-位移曲线较为分散、无明显规律,但曲线间的整体差异并不显著。然而,在 LSP TC4 钛合金的压痕试验中,由于测点众多,难以保证压头只与 α 相或 β 相进行接触。同时,纳米压痕测试试样很薄,残余应力在加工过程中有一定程度的释放。因此,在该反演分析中忽略了残余应力的影响。这种简化策略也在经渗碳热处理^[12]、超声表面滚压^[23]、激光淬火^[27]等表面强化处理后的材料强化层参数反演研究中被广泛使用。

典型的纳米压痕载荷-位移曲线如图 8 所示。其中, P 为施加荷载, h 为压入深度, C 为加载段的曲率, P_m 为最大载荷, h_m 为相应的最大压深, P_u 为卸载载荷, h_r 为卸载完成后被测材料表面留下的残余深度, S 为接触刚度, W_t 为载荷 P 在加载过程做的总功, W_e 为卸载过程释放的弹性功, W_p 为塑性功。在加载阶段,压痕响应符合 Kick 定律^[30]:

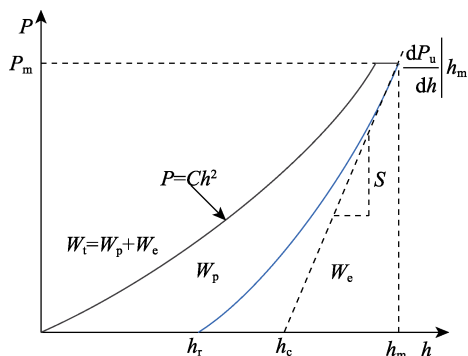


图8 典型载荷-位移曲线
Fig.8 Typical load-displacement curve

$$P = Ch^2 \quad (6)$$

根据经典的 Oliver-Pharr^[31]模型,使用卸载曲线的初始卸载段部分可以通过式(7)计算出卸载刚度,并将其定义为接触刚度 S :

$$S = \left. \frac{dP_u}{dh} \right|_{h=h_m} \quad (7)$$

接触深度 h_c 满足^[32]:

$$h_c = h_m - 0.75 P_m / S \quad (8)$$

接触刚度与压入折合模量 E_r 间存在如下关系:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \quad (9)$$

式中: $A(h_c)$ 为接触面积; β 为压头形状修正系数, $\beta=1.034$ ^[33]。由于金刚石压头的弹性模量远大于钛合金,弹性模量 E 可近似表示为:

$$E = E_r (1 - \nu^2) \quad (10)$$

其中: ν 为试验材料的泊松比,取 0.34。

Dao 等^[34]针对服从线弹性-幂律硬化本构模型的材料,在泊松比为 0.3 时,进行了弹性模量在 10~210 GPa、屈服强度在 30~3 000 MPa 以及幂律应变硬化指数在 0~0.5 范围的 76 种工况的纳米压痕模拟,并通过分析有限元模拟结果拟合出如下无量纲方程:

$$\Pi_1 \left(\frac{E_r}{\sigma_{0.033}} \right) = \frac{C}{\sigma_{0.033}} \quad (11)$$

$$\Pi_2 \left(\frac{h_r}{h_m} \right) = \frac{W_p}{W_t} \quad (12)$$

$$\Pi_3 \left(\frac{\sigma_{0.033}}{E_r}, n \right) = \frac{h_r}{h_m} \quad (13)$$

其中, $\sigma_{0.033}$ 为特征应力,满足:

$$\sigma_{0.033} = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} 0.033 \right)^n \quad (14)$$

综上所述,表面强化层材料参数的反演分析流程如图 9 所示。

根据图 9 所示的反演流程即可获得强化层的弹塑性本构参数:

1) 首先根据 O-P 方法计算接触刚度 S ,进而通过式(8)~(10)得到压入折合模量 E_r 和弹性模量 E 。

2) 之后分别拟合试验曲线的加载段与卸载段,得到曲率 C 和塑性功与总功的比值 W_p/W_t 。

3) 接着根据无量纲方程式(11)和式(12)分别确定特征应变 $\sigma_{0.033}$ 和残余深度与最大压入深度的比值 h_r/h_m ,进而通过式(13)得到应变硬化指数 n 的初值。

4) 根据得到的特征应变 $\sigma_{0.033}$ 和应变硬化指数 n ,代入到式(14)可得出屈服应力 σ_y 的结果,于是得到初始的幂强化方程。

5) 经 Dao 等^[34]的研究表明, n 的结果需结合有限元模拟进一步确定。将初步得到的材料参数引入有

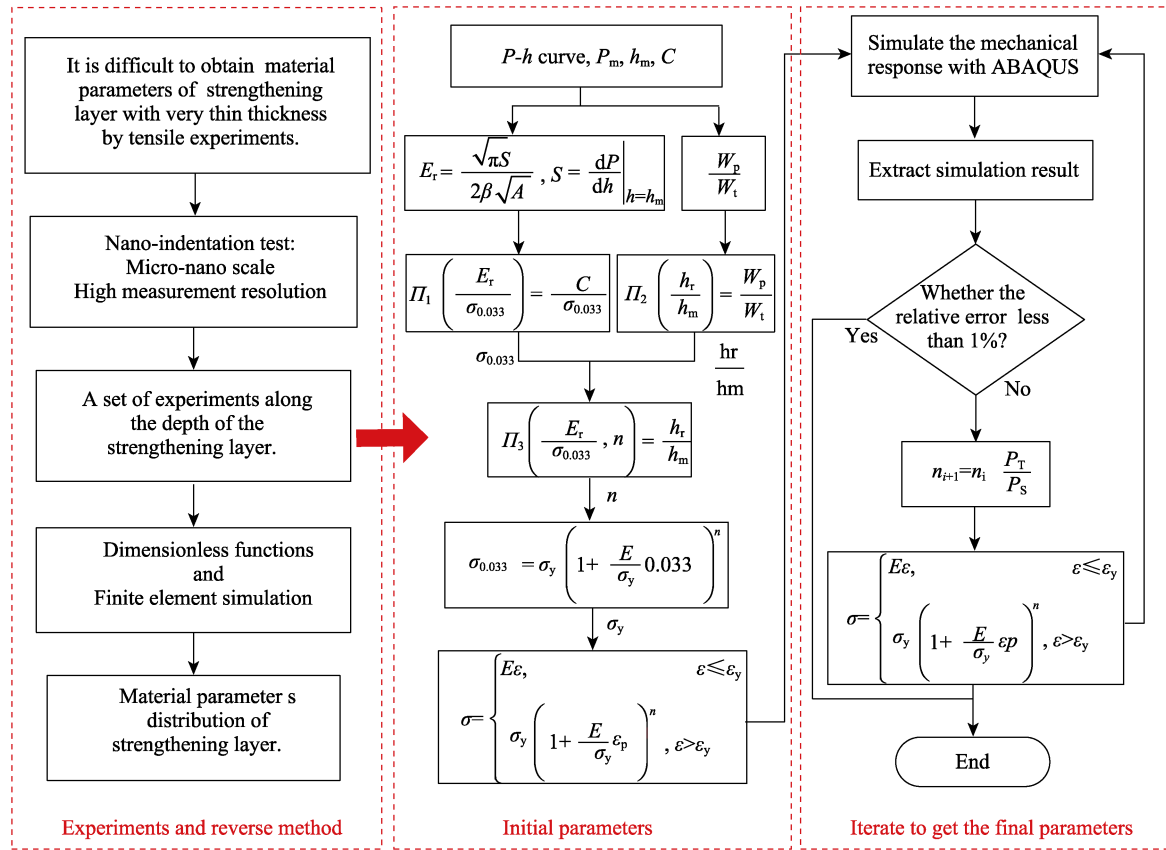


图 9 材料参数反演分析的流程

Fig.9 Flow chart for reverse analysis of material parameters

限元模型中, 进行纳米压痕响应的仿真计算, 并提取出载荷-位移曲线。依次对比模拟和试验的卸载刚度与载荷峰值。通过式 (15) [27] 对应变硬化指数的初值进行适当的调整优化有助于改善迭代效率, 不断迭代更新直至模拟结果与试验结果的误差在 1% 内。

$$n_{i+1} = n_i \frac{P_T}{P_S} \quad (15)$$

式中: P_T 为试验载荷峰值; P_S 为模拟载荷峰值。

3 结果与讨论

3.1 反演应力-应变曲线

基于 2.3 节的反演算法, 依次求解无量纲方程式

(11) ~ (13), 分别获得特征应力、残余深度与压入深度的比值, 并由此获得应变硬化指数初值。由于无量纲函数难以解析求解, 因此分别绘制无量纲函数等号两侧表达式的曲线, 取曲线交点所对应的横坐标作为无量纲函数的解, 如图 10 所示。

在经过数次迭代计算之后, 得到迭代误差在 1% 内的距表面不同深度处的材料塑性参数, 见表 2。由表 2 可知, LSP TC4 钛合金表面强化层的塑性材料参数均呈梯度分布。随着距表面距离的增加, 塑性功与总功的比值以及残余深度与压入深度的比值逐渐增大, 加载曲率逐渐减小, 说明表面强化层抵抗塑性变形的能力优于母材。屈服强度随距表面距离的增加而减小, 最表层的屈服强度为 1 396.4 MPa, 相较于母

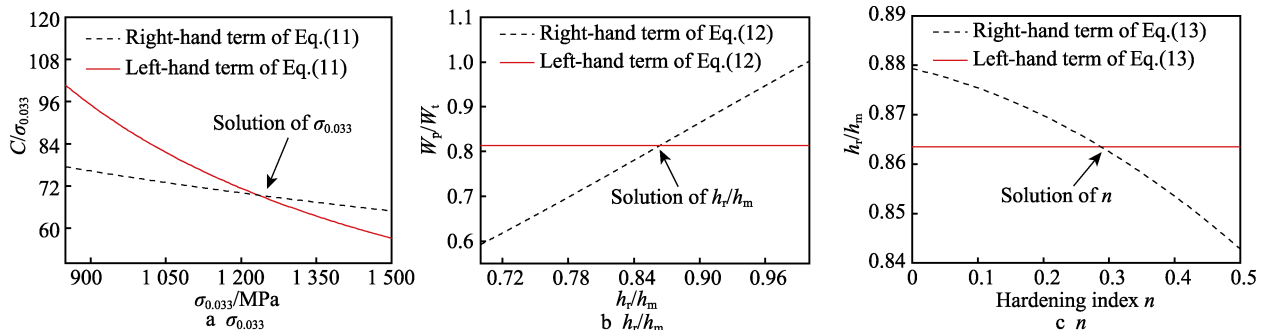


图 10 材料本构参数的确定

Fig.10 Determination of constitutive parameters

表 2 距表面不同深度处的塑性参数
Tab.2 Plastic parameters at different distances from the surface

Distance from surface/ μm	C/GPa	W_p/W_t	h_r/h_m	σ_y/MPa	n
140	110.9	0.789	0.847	1 396.4	0.167
160	100.5	0.793	0.849	1 290.3	0.171
240	98.4	0.810	0.861	1 161	0.178
300	87.4	0.817	0.866	909.6	0.243
360	89.0	0.822	0.870	911.7	0.255
540	89.1	0.821	0.869	920.0	0.252
600	85.6	0.813	0.864	914.9	0.249
720	86.6	0.822	0.870	883.3	0.252
900	86.6	0.826	0.873	882.5	0.251

材屈服强度值(约 903 MPa)有显著提高,增大了约 55%。应变硬化指数 n 在强化层内随距表面距离的增加而增加,而在基体内趋于稳定。强化层内应变硬化指数沿深度方向的分布趋势与弹性模量刚好相反,这可能是因为应变硬化指数的经验公式与弹性模量的倒数相关。此外,在基体不同深度处应变硬化指数反演结果的数值波动甚微,相应的波动误差不超过 2.4%,因此可近似认为基体内部的应变硬化指数稳定在 0.252。LSP TC4 钛合金强化层内部的应变硬化指数存在梯度分布,其影响因素众多,目前还鲜有明确的试验结果。这里反演出的基体应变硬化指数与

文献[35-36]给出的范围相符。

根据得到的材料弹塑性参数的结果,将其代入线弹-幂律应变硬化本构模型中,即可计算得到迭代误差在 1%内的表面强化层不同深度处材料点的应力-应变曲线,如图 11 所示。

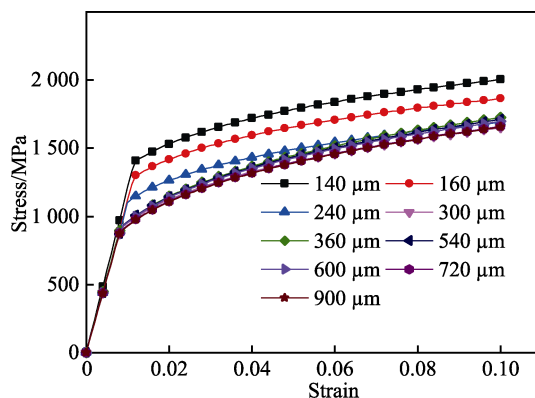


图 11 距表面不同距离处的应力-应变曲线
Fig.11 Stress-strain curves at different distances from the surface

3.2 反演方法验证

将距表面不同距离处的载荷-位移曲线模拟结果分别与试验结果进行对比,如图 12 所示。可以看出,模拟得到的载荷-位移曲线与试验结果吻合较好。

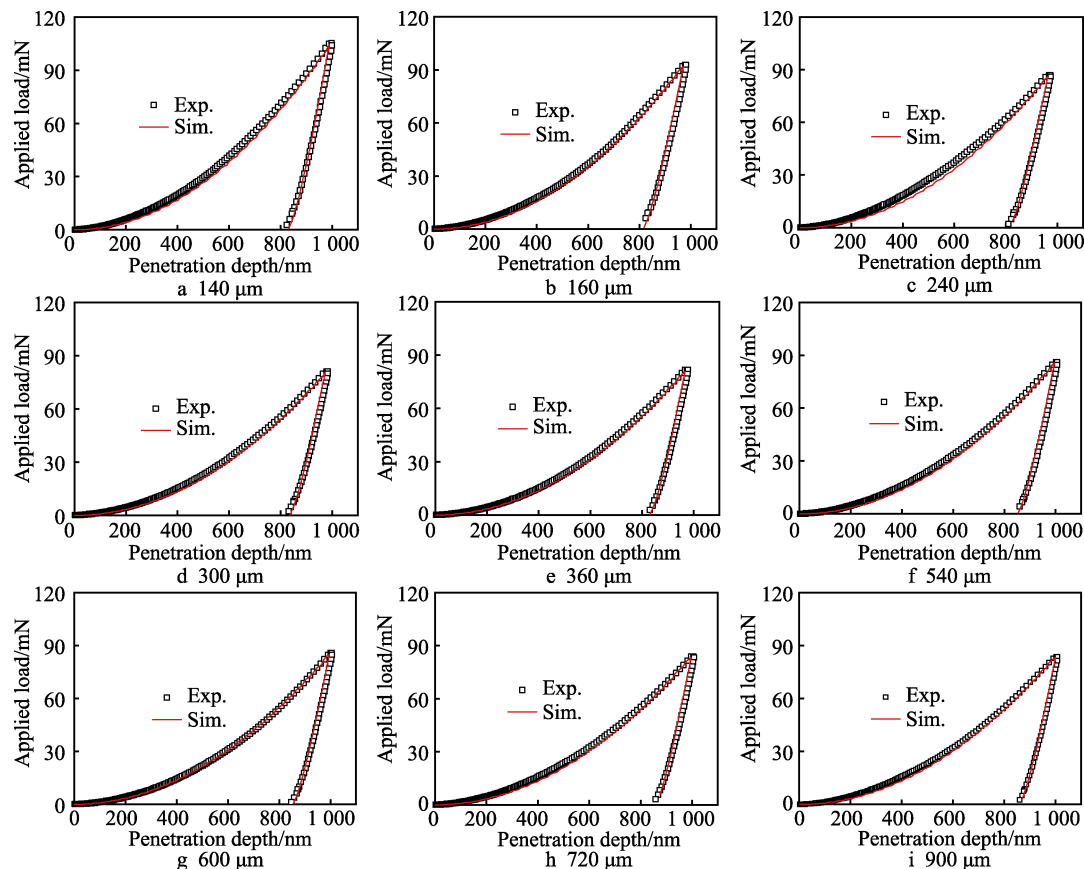


图 12 距表面不同距离处的试验载荷-位移曲线与模拟曲线的比较
Fig.12 Comparisons between experimental load-displacement curves and simulation curves at different distances from the surface

根据有限元模拟得到的距表面不同距离处的载荷-位移曲线, 重新进行了弹性模量与纳米硬度的计算, 并与试验确定结果进行对比, 如图 13 所示。可以看出, 模拟结果与试验结果总体上符合得较好。弹性模量依赖于初始卸载段曲线的斜率(即卸载刚度), 而硬度水平则直接取决于最大压入载荷与接触斑面积之比。将卸载刚度和最大载荷的收敛误差阈值均设置为 1%, 可同时保证弹性模量和纳米硬度的反演精

度。与试验结果相比, 弹性模量和硬度结果的相对误差分别位于 7% 和 3% 以内。弹性模量主要与卸载刚度有关, 而纳米硬度直接取决于最大载荷与接触斑面积之比。在压痕过程中, 由于试样会发生复杂的塑性变形, 最大载荷、接触斑面积与弹性模量间并无解析映射关系, 弹性模量与纳米硬度也无明确的对应关系, 因此二者最大误差的出现位置也无一一对应关系, 但会受到数值误差波动的影响。

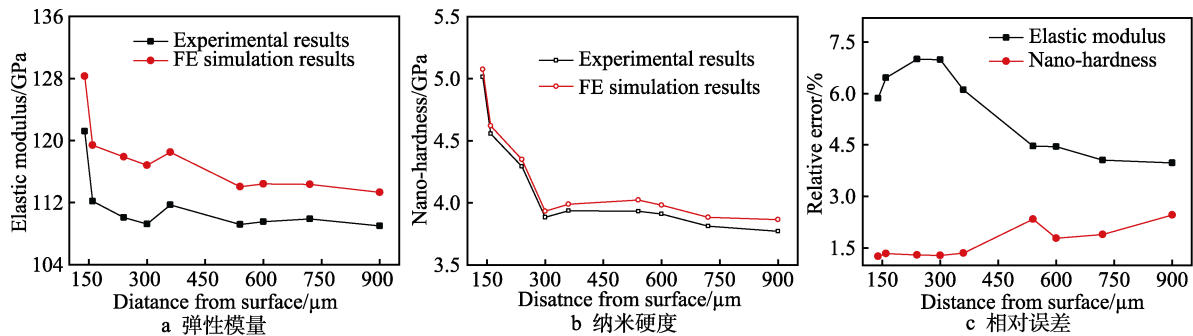


图 13 纳米压痕试验与有限元模拟结果的对比

Fig.13 Comparisons between nano-indentation experimental results and finite element simulation results: a) elastic modulus; b) nano-hardness; c) relative error

尽管在反演 LSP TC4 钛合金本构参数得到了弹性模量、屈服应力以及应变硬化指数的梯度分布结果, 但仍存在一些尚待改进之处。例如, 在试验方面, 仅对单一工艺参数的 LSP TC4 钛合金试样进行试验, 未考虑 LSP 工艺参数对强化层性能的影响; 其次, 光斑区域中心与搭接区域处的纳米硬度也存在差异, 对横向不同位置处纳米硬度分布的研究有待进一步开展; 未考虑 LSP 后表面粗糙度对反演结果的影响; 在有限元模拟中忽略了 LSP 所诱导残余应力分布对压痕响应的影响, 导致模拟结果与纳米压痕试验结果尚有一定的偏差; 考虑准静态加载工况而选用的幂律应变硬化模型具有应用局限性, 而涉及率相关的 J-C 本构模型的材料参数反演方法尚有待深入研究。

4 结论

1) 对 LSP TC4 钛合金表面强化层进行了纳米压痕试验, 获得了弹性模量和纳米硬度沿强化层深度方向的梯度分布, 发现强化层表面的弹性模量和纳米硬度值较母材分别提高了近 11% 和 30%。

2) 基于线弹-幂律应变硬化模型, 结合无量纲方程进行了 LSP 后 TC4 钛合金强化层本构参数的反演计算, 反演结果与试验结果吻合得较好。其中, 有限元模拟和纳米压痕试验得到的载荷-位移曲线基本吻合, 弹性模量和纳米硬度的相对误差分别小于 7% 和 3%。

3) 结合参数反演结果发现, LSP 强化层内的屈服强度与应变硬化指数沿深度方向分别递减和递增, 表面强化层的抗塑性变形能力较母材大幅提升。

参考文献:

- [1] 田永武, 朱乐乐, 李伟东, 等. 高温钛合金的应用及发展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 17-20.
TIAN Yong-wu, ZHU Le-le, LI Wei-dong, et al. Application and Development of High Temperature Titanium Alloys[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 17-20.
- [2] 王欣, 罗学昆, 宇波, 等. 航空航天用钛合金表面工程技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 14-24.
WANG Xin, LUO Xue-kun, YU Bo, et al. Research Progress on Surface Engineering Technology of Aerospace Titanium Alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 14-24.
- [3] 陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 14-20.
CHEN Jing-sheng, SUN Bao-sen, AN Kang. Titanium Alloys for Ordnance Equipment Applications[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 14-20.
- [4] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 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.
YANG Ying-li, LUO Yuan-yuan, ZHAO Heng-zhang, et al. Research and Application Status of Titanium Alloys for Warships in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 538-544.
- [5] 黄志辉, 王超, 孙龙生, 等. 钛合金材料在轨道交通中的应用前景[J]. 机车车辆工艺, 2017(2): 11-13.
HUANG Zhi-hui, WANG Chao, SUN Long-sheng, et al.

- Application Prospect of Titanium Alloy Material in Rail Transit[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2017(2): 11-13.
- [6] 吴琰, 赵昱颢, 李岩. 钛及钛合金表面纳米管的生物功能化研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 1-8.
WU Yan, ZHAO Yu-jie, LI Yan. Research Progress on the Biofunctionalization of Nanotubes on Titanium and Titanium Alloys[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 1-8.
- [7] LIN Yu, DING Shi-yan, ZHOU Liu-cheng, et al. Influence of Laser Shock Peening Parameters on the Abrasive Wear Behavior of TC4 Titanium Alloy under Controlled Cycling Impact[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096546.
- [8] NIE Xiang-fan, HE Wei-feng, ZHOU Liu-cheng, et al. Experiment Investigation of Laser Shock Peening on TC6 Titanium Alloy to Improve High Cycle Fatigue Performance[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 161-167.
- [9] WU Xian-qian, HUANG Chen-guang, WANG Xi, et al. A New Effective Method to Estimate the Effect of Laser Shock Peening[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(5): 322-329.
- [10] GUO Wei, SUN Ru-jian, SONG Bin-wen, et al. Laser Shock Peening of Laser Additive Manufactured Ti_6Al_4V Titanium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 503-510.
- [11] 薛军, 冯建涛, 马长征, 等. 激光冲击强化对激光增材 TC4 钛合金组织和抗氧化性的影响[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 198-205.
XUE Jun, FENG Jian-tao, MA Chang-zheng, et al. Influence of Laser Shock Peening on Microstructure and Oxidation Resistance of Laser Additive Manufactured TC4 Titanium Alloy[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 198-205.
- [12] 郝梦飞. 表面变质层弹塑性参数的表征与测试[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
HAO Meng-fei. Characterization and Test of Elastic-Plastic Parameters of Surface Metamorphic Layer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [13] 许杨剑, 李翔宇, 王效贵. 基于遗传算法的功能梯度材料参数的反演分析[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 170-176.
XU Yang-jian, LI Xiang-yu, WANG Xiao-gui. Genetic Algorithm Based Inverse Analysis for Functionally Graded Material Parameters[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 170-176.
- [14] GIANNAKOPOULOS A E. Indentation of Plastically Graded Substrates by Sharp Indentors[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(9): 2495-2515.
- [15] YUAN Fu-ping, JIANG Ping, XIE Ji-jia, et al. Analysis of Spherical Indentation of Materials with Plastically Graded Surface Layer[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(3/4): 527-536.
- [16] BRANCH N A, ARAKERE N K, SUBHASH G, et al. Determination of Constitutive Response of Plastically Graded Materials[J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(5): 728-738.
- [17] BRANCH N A, SUBHASH G, ARAKERE N K, et al. A New Reverse Analysis to Determine the Constitutive Response of Plastically Graded Case Hardened Bearing Steels[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(3/4): 584-591.
- [18] GAO X L, JING X N, SUBHASH G. Two New Expanding Cavity Models for Indentation Deformations of Elastic Strain-Hardening Materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7/8): 2193-2208.
- [19] 陈正阁, 武永丽, 薛全喜, 等. 激光冲击强化对片层 TC11 钛合金组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 343-352.
CHEN Zheng-ge, WU Yong-li, XUE Quan-xi, et al. Effect of Laser Shock Strengthening on Microstructure and Properties of Lamellar TC11 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 343-352.
- [20] 孟帅, 崔承云, 陈凯, 等. 激光冲击高锰钢的微观组织与力学性能[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(12): 760-765.
MENG Shuai, CUI Cheng-yun, CHEN Kai, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Shock-Peened High-Manganese Steel[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(12): 760-765.
- [21] 万天一, 崔承云, 彭希超. 激光冲击对灰铸铁熔凝层组织和性能的影响[J]. 稀有金属, 2020, 44(9): 967-973.
WAN Tian-yi, CUI Cheng-yun, PENG Xi-chao. Microstructures and Properties of Melted Layer of Gray Cast Iron with Laser Shock Processing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(9): 967-973.
- [22] 张泰华. 微/纳米力学测试技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ZHANG Tai-hua. Micro/Nano Mechanics Testing Technology and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [23] 孙银莎, 贾云飞, 苑光健, 等. 超声表面滚压加工纯钛梯度材料的力学性能反演与有限元分析[J]. 机械工程材料, 2021, 45(10): 58-65.
SUN Yin-sha, JIA Yun-fei, YUAN Guang-jian, et al. Inversion and Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Pure Titanium Gradient Material by Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(10): 58-65.
- [24] NIE Xiang-fan, HE Wei-feng, CAO Zhen-yang, et al. Experimental Study and Fatigue Life Prediction on High Cycle Fatigue Performance of Laser-Peened TC4 Titanium Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 822: 141658.
- [25] 陈雪鹏, 张凌峰, 熊毅, 等. 激光冲击强化对激光增材制造 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 161-169.
CHEN Xue-peng, ZHANG Ling-feng, XIONG Yi, et al.

- Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Properties of Laser Additive Manufactured TC4 Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 161-169.
- [26] 李莉佳. 残余应力下金属材料压痕响应的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
LI Li-jia. Simulation Analysis and Experimental Study on Indentation Response of Metal Materials under Residual Stress[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [27] 魏健蓝, 赵吉中, 丁立, 等. 激光淬火 $U_{71}Mn$ 钢轨面淬硬层的材料参数反演分析[J]. 机械工程材料, 2019, 43(4): 73-78.
WEI Jian-lan, ZHAO Ji-zhong, DING Li, et al. Reverse Analysis for Material Parameters of Hardening Layer on Laser Quenched $U_{71}Mn$ Steel Rail Surface[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(4): 73-78.
- [28] OLIVER W C, PHARR G M. Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology[J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(1): 3-20.
- [29] LEE J, LEE C, KIM B. Reverse Analysis of Nano-Indentation Using Different Representative Strains and Residual Indentation Profiles[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3395-3404.
- [30] BOLSHAKOV A, PHARR G M. Influences of Pileup on the Measurement of Mechanical Properties by Load and Depth Sensing Indentation Techniques[J]. Journal of Materials Research, 1998, 13(4): 1049-1058.
- [31] OLIVER W C, PHARR G M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [32] SNEDDON I N. The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile[J]. International Journal of Engineering Science, 1965, 3(1): 47-57.
- [33] KING R B. Elastic Analysis of some Punch Problems for a Layered Medium[J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(12): 1657-1664.
- [34] DAO M, CHOLLACOOP N, VAN VLIET K J, et al. Computational Modeling of the Forward and Reverse Problems in Instrumented Sharp Indentation[J]. Acta Materialia, 2001, 49(19): 3899-3918.
- [35] 方新文, 管佳佳. TC4 钛合金在准静态拉伸下的本构模型及失效参数[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 831-836.
FANG Xin-wen, GUAN Jia-jia. Constitutive Model and Failure Parameters of TC4 Titanium Alloy under quasi-Static Tensile[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 831-836.
- [36] 王德兵, 王世康. 有限元分析在钛合金叶轮加工中的应用[J]. 新技术新工艺, 2019(5): 26-29.
WANG De-bing, WANG Shi-kang. Application of Finite Element Analysis in Titanium Alloy Impeller Processing[J]. New Technology & New Process, 2019(5): 26-29.

责任编辑: 刘世忠

(上接第 402 页)

- [28] 尹洪飞, 黄巍, 王晓雷. Ni/GO 复合镀层的制备与摩擦学性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 51-53.
YI Hong-fei, HUANG Wei, WANG Xiao-lei. Preparation and Tribological Properties of Ni/GO Composite Coatings[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(5): 51-53.
- [29] 陈娟娟. 石墨烯/Ni 基复合镀层的制备及摩擦学性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
CHEN Juan-juan. Research on Preparation and Tribological Properties of Nickel-based Composite Coating Containing Graphene[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [30] YAN C Q, KARTHIKK N, LI H, et al. The Nickel Based Composite Coating Fabricated by Pulse Electroplating Through Graft Between Nano-TiN and Graphene Oxide[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15714-15718.
- [31] 李娟, 张彩丽, 刘颖, 等. 退火对电沉积纳米晶镍在不同腐蚀液中耐蚀性影响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(3): 235-240.
LI Juan, ZHANG Cai-li, LIU Ying, et al. Effect of Annealing Treatment on Corrosion Resistance in Solutions of NaCl and NaOH for Electrodeposited Nanocrystalline Nickel Films[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(3): 235-240.
- [32] SARANGI C K, SAHU B P, MISHRA B K, et al. Pulse Electrodeposition and Characterization of Graphene Oxide Particle-reinforced Ni-W Alloy Matrix Nanocomposite Coatings[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2020, 50(2): 265-279.
- [33] 张志莲, 张玉林, 陈飞. 氧化石墨烯对 Mg-Li 合金微弧氧化陶瓷层微观结构及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 306-313.
ZHANG Zhi-lian, ZHANG Yu-lin, CHEN Fei. Effect of Graphene Oxide on Microstructure and Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Coating on Mg-Li Alloy[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 306-313.

责任编辑: 蓝英侨