

设计与优化提供理论支持和实践依据。

4.2 耐腐蚀与力学性能分析

高分子防污涂层除防污外，还需具备优良的耐腐蚀和力学性能，以确保在复杂海洋环境下的稳定性与可靠性。电化学阻抗谱（EIS）和极化曲线是常用的耐蚀性能测试方法，通过分析不同涂层体系下的阻抗变化、腐蚀电流密度及极化电位，揭示其抗蚀机理。盐雾腐蚀测试则在加速环境中考察涂层的耐盐雾性能，模拟实际海上服役的腐蚀过程。力学性能方面，附着力测试（如划痕、拉脱）、耐磨损测试及柔韧性测试，是评价涂层与钛合金基体结合强度、抵抗机械损伤能力的关键指标。涂层在满足防污的基础上，只有兼具高耐腐蚀性和优良力学性能，才能确保其在实际工程中的长期服役安全和经济效益。

4.3 防污机理与界面作用分析

高分子防污涂层的防污机理主要体现在物理屏障、表面能调控和化学抑制三方面。低表面能高分子材料通过降低细菌、藻类等生物的黏附概率，使其难以在表面形成稳固的生物膜；而涂层中的疏水、亲水基团则可调节水膜结构，构建物理屏障，有效阻断微生物的定植和生长。部分高分子涂层还能释放生物抑制剂，通过生物学活性组分抑制海洋生物的繁殖和附着。界面作用则是涂层防护性能的核心，高分子链与钛合金表面的物理嵌合和化学键合，提升了界面结合强度和整体稳定性。深入剖析分子结构、表面能与生物附着的关系，不仅有助于揭示防污机理，还为开发高效、长效的新型高分子防污涂层提供理论基础。

5 高分子防污涂层的工程应用与前景展望

5.1 典型高分子防污涂层工程应用案例

随着绿色防污理念的深入推广，聚二甲基硅氧烷（PDMS）、氟聚合物、功能化聚酯、丙烯酸胺类季铵盐抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层等高分子防污涂层在船舶工程中得到了批量化和多样化的实际应用。这些材料通过优化分子结构，显著提升了对海洋生物附着的抑制效果，并有效降低了对环境的潜在危害。例如，某型海洋科考船采用多层复合高分子防污涂层后，经实际服役一年，船体表面生物附着面积减少了90%以上，船舶燃油消耗大幅下降，维护清理周期延长近一倍，整体运营成本和能耗水平得到有效控制。不同类型高分子涂层在实际工程应用中需根据目标水域的生物多样性、流速、温度以及船型特性等进行定制化设计和分层组合，以兼顾抗污、防腐、耐磨等多重需求。近年来，随着现场经验的积累和表面工程技术的进步，高分子防污涂层已成为提升船舶经济性与绿色性能的重要技术路径，极大推动了行业的高质量发展和生态友好型转型。

5.2 技术创新与多功能一体化发展

材料科学和纳米技术的不断突破为高分子防污涂层的功能集成和性能提升注入了新活力。传统防污涂层多以单一功能为主，难以兼顾复杂海洋环境下的多重挑战。当前，智能响应型涂层、自修复功能材料、多层复合结构以及纳米

填料的应用逐渐成为研究热点。智能防污涂层能根据温度、pH或生物附着信号实现性能自调节，提升了动态适应性。自修复材料通过微胶囊释放机制修复表面微损伤，延长了涂层寿命和服役周期。多层复合结构则融合了多种高分子与无机成分，实现了防污、抗菌、防腐、耐磨等多重功能的有机统一。纳米填料如石墨烯、二氧化钛等的引入进一步提升了涂层的力学强度、抗紫外和抗老化能力。通过界面分子工程和多场（光、电、热）耦合设计，有望实现智能感知和主动响应，为船舶表面防护技术带来革命性突破，推动高分子防污涂层向多功能一体化、高效长效方向发展。

5.3 未来发展方向与挑战

尽管高分子防污涂层在船舶行业已展现出巨大应用潜力，但大规模工程化应用、服役持久性、环境友好性及成本控制等方面仍存在诸多挑战。未来的技术发展需在分子设计、界面工程和功能集成方面持续创新，提升涂层在极端海洋环境下的耐磨、耐蚀和自修复能力。同时，应加大对无毒、可降解绿色材料的研发力度，降低环境污染风险，确保符合国际绿色船舶标准。为促进涂层技术成果转化与推广，亟需完善标准化性能测试和工程评价体系，构建从材料研发、实验验证到工程示范的全链条创新平台。此外，多学科的协同创新尤为关键，需加强材料科学、表面工程、环境生态及智能制造等领域的深度融合，共同推动高分子防污涂层技术的持续突破。随着全球航运绿色低碳转型和可持续发展战略的深入实施，高分子防污涂层将在船舶及相关海洋工程领域发挥越来越重要的作用。

6 结语

钛合金作为高性能船舶结构的关键材料，面临严峻的生物污损与腐蚀威胁。高分子防污涂层以其分子可设计性、环境友好性和优异的防护性能，成为钛合金表面防护的重要技术路径。本文系统梳理了高分子防污涂层的材料选择、结构设计、制备工艺与性能表征，分析其防污机理和工程应用成效。研究表明，合理设计的高分子涂层能够有效提升钛合金表面的抗污与耐腐蚀能力，延长船舶服役周期，降低维护成本。展望未来，随着材料科学与工程技术的不断进步，高分子防污涂层将在船舶、海洋及相关领域发挥更大作用，助力绿色航运和可持续发展。

参考文献

- [1] 张琪,罗丽蓉,刘涛,等.船舶海水管系TC4钛合金的表面涂层与耐蚀性能[J].金属热处理,2019,44(01):185-189.
- [2] 夏申琳,王刚,杨晓,等.钛及钛合金在船舶中的应用[J].金属加工(冷加工),2016,(19):40-41.
- [3] 李德强,王树森,包恩达.钛合金材料在船舶材料上的应用与发展[J].世界有色金属,2015,(09):127-128.
- [4] 赵成志,余姣姣,袁玉平,等.船舶海水管系钛合金组织及腐蚀性能研究[J].特种铸造及有色合金,2013,33(12):1161-1164.
- [5] 程德彬.船用钛合金与航空钛合金的使用性能差异[J].材料开发与应用,2012,27(03):60-63.

Study on unidirectional tensile mechanical properties and anisotropy of TA1 titanium alloy sheet

Xuan Li¹ Gang Zhao¹ Guogang Li¹ Ruowei Shao²

1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Shaanxi, Xi'an 710089, China

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning, 110136, China

Abstract

To investigate the room-temperature forming properties of TA1 titanium alloy sheets, a unidirectional tensile testing system was employed to study the effects of loading speed (1, 3, 5 mm/min) and orientation angle (0°, 45°, 90°) on the mechanical performance of 1 mm thick TA1 sheets. Results showed that as loading speed increased from 1 mm/min to 5 mm/min, the 0° deformation decreased from 48.92% to 40.31%, while yield strength dropped from 218.4 MPa to 196.9 MPa, demonstrating significant strain rate sensitivity. Different orientations exhibited distinct anisotropy: the 45° orientation showed optimal plasticity (deformation 51.85%) but lowest strength (tensile strength 295.8 MPa), whereas the 90° orientation had highest strength (yield strength 271.3 MPa) but poorest plasticity (deformation 43.23%). This study revealed the coupled effect between TA1 sheet anisotropy and loading speed, providing a theoretical basis for optimizing room-temperature forming process parameters.

Keywords

TA1 titanium alloy; unidirectional tensile; anisotropy; loading speed; mechanical properties

TA1 钛合金板材单向拉伸力学性能及各向异性研究

李轩 赵刚 李国刚 邵若伟

1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 中国·陕西 西安 710089

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 中国·辽宁 沈阳 110136

摘 要

为探究TA1钛合金板材室温成形性能, 采用单向拉伸试验系统研究了加载速度(1、3、5 mm/min)和取向角度(0°、45°、90°)对1 mm厚TA1板材力学性能的影响规律。结果表明: 加载速度从1 mm/min增至5 mm/min时, 0°方向变形量从48.92%降至40.31%, 屈服强度从218.4 MPa降至196.9 MPa, 呈现明显的应变速率敏感性; 不同取向表现出显著各向异性, 45°方向塑性最优(变形量51.85%)但强度最低(抗拉强度295.8 MPa), 90°方向强度最高(屈服强度271.3 MPa)但塑性最差(变形量43.23%)。研究揭示了TA1板材各向异性与加载速度的耦合效应, 为其室温成形工艺参数优化提供了理论依据。

关键词

TA1钛合金; 单向拉伸; 各向异性; 加载速度; 力学性能

1 引言

钛及其合金凭借高比强度、低密度(4.5 g/cm³)、优异耐腐蚀性和宽温域服役能力, 已成为航空航天关键结构材料^[1-3]。第四代战斗机F-22中钛合金用量高达41%, 主要应用于机身框架、蒙皮和压缩机叶片等关键部件^[4]。然而, 钛合金室温成形面临诸多挑战: 高强度导致成形载荷大、低弹性模量引发严重回弹、强各向异性造成变形不均匀等^[5-6]。

TA1作为工业纯钛的典型代表, 因其良好的塑性和耐腐蚀性在航空制造中应用广泛。但目前关于TA1板材各向异

性及加载速度对成形性能影响的系统研究相对匮乏^[7-8]。任家陶等^[9]研究了TA2板材不同取向的拉伸行为, 发现屈服强度随取向角增大而规律性增加。高铁军等^[10]探索了黏性介质压力成形对TA1钛合金成形性能的影响机制。

本文通过系统的单向拉伸试验, 研究加载速度和取向角度对TA1板材力学性能的影响规律, 分析其各向异性特征及形成机理, 为后续复杂应力状态下的成形性能研究和工艺参数优化提供理论支撑。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及试样制备

试验材料为厚度1 mm的TA1工业纯钛板材, 其化学成分符合GB/T 3620.1-2016标准要求。依据GB/T 228.1-

【作者简介】李轩(1989-), 男, 工程师, 主要研究飞机板材塑性成形研究。

2010《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》设计单向拉伸试样，总长度160 mm，标距段长度65 mm，标距段宽度20 mm（图1）。采用激光切割加工试样，并对切割边缘进行精细打磨以消除加工影响。为研究材料各向异性，分别制备与轧制方向成0°、45°和90°的试样，每组条件制备3个平行试样以确保数据可靠性。

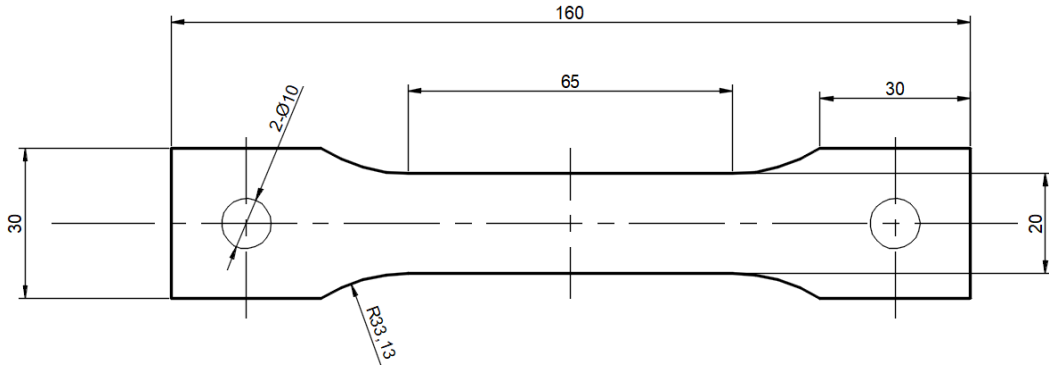


图1 单向拉伸试样尺寸示意图

2.2 试验设备与方案

试验采用WDW-T100型电子万能材料试验机，最大载荷100 kN，速度调节范围0.05~1000 mm/min，位移测量精度±0.5%。设置三种加载速度：1、3、5 mm/min，室温条件下进行拉伸试验。

2.3 数据处理方法

变形量 δ 计算公式

$$\delta = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

工程应变 ε 与工程应力 σ 分别为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.3)$$

其中， L_0 为初始标距长度， L_u 为拉伸后标距长度， ΔL 为位移变化量， F 为拉伸力， A_0 为初始横截面积。

3 试验结果与分析

3.1 取向角度对力学性能的影响

图2~4展示了不同加载速度下三个取向的工程应力-应变曲线。在基准速度（1 mm/min）条件下，力学性能表现出明显的取向依赖性：变形能力：45°方向最优（51.85%），0°方向次之（48.92%），90°方向最弱（43.23%）。（屈服强度：90°方向最高（271.3 MPa），45°方向居中（230.1 MPa），0°方向最低（218.4 MPa）。抗拉强度：90°方向（329.5 MPa）> 0°方向（323.1 MPa）> 45°方向（295.8 MPa））

这种规律在3 mm/min和5 mm/min加载速度下保持稳定，表明TA1板材的各向异性特征在1~5 mm/min速度范围内具有良好的一致性。45°方向始终保持最优塑性，而90°方向持续展现最高强度，体现了典型的塑性-强度倒置

关系。

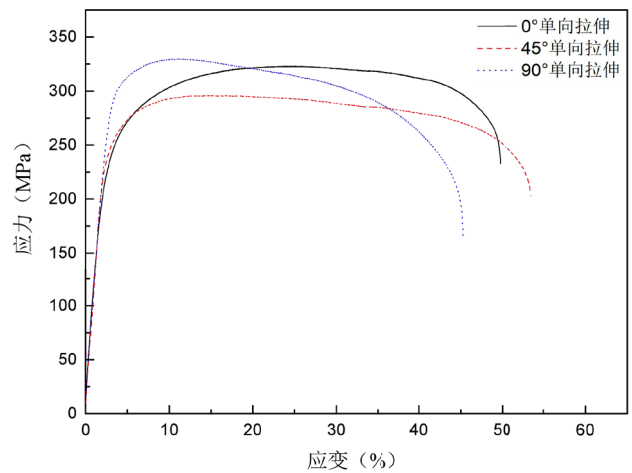


图2 1 mm/min 下不同取向试样工程应力—应变曲线（0°、45°、90°）

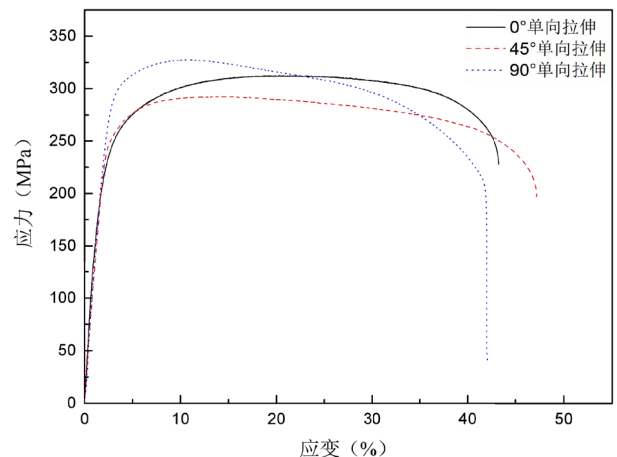


图3 3 mm/min 下不同取向试样工程应力—应变曲线（0°、45°、90°）

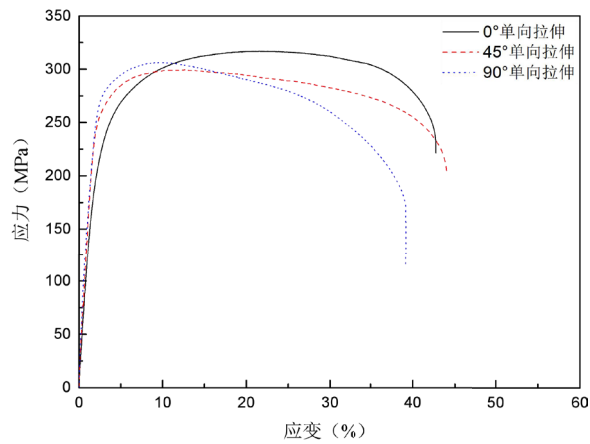
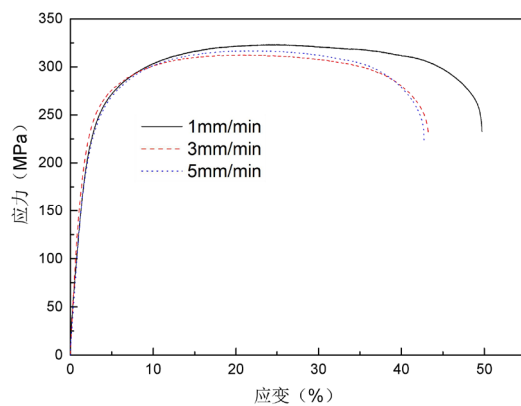
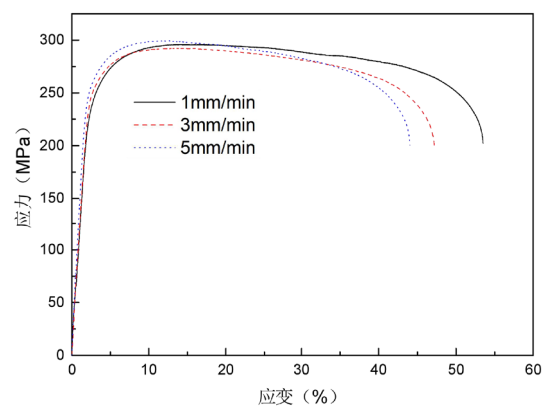


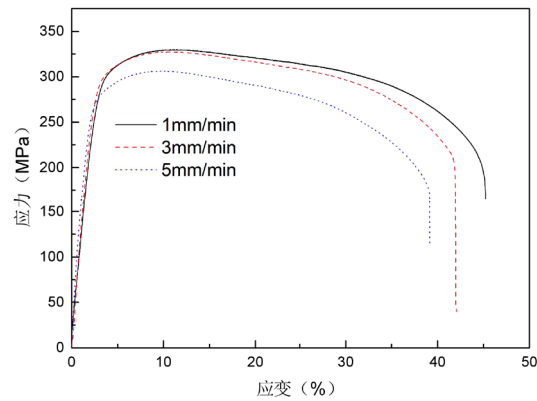
图 4 5 mm/min 下不同取向工程应力 - 应变曲线
(0° 、 45° 、 90°)



a) 0° 单向拉伸

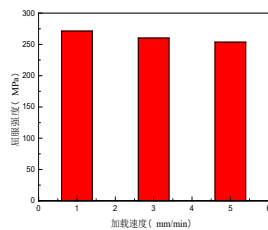


b) 45° 单向拉伸

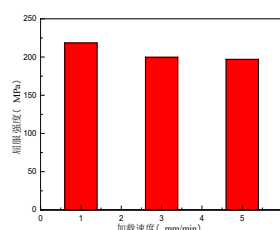


c) 90° 单向拉伸

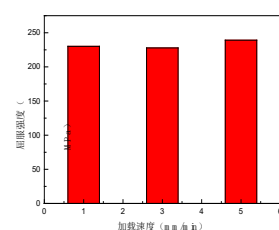
图 5 不同加载速度条件下单向拉伸试件工程应力 - 应变曲线



a) 0° 单向拉伸



b) 45° 单向拉伸



c) 90° 单向拉伸

图 6 不同加载速度条件下对单向拉伸试件屈服强度的影响

3.2 加载速度对力学性能的影响

图 5 和图 6 分别展示了不同取向在三种加载速度下的应力 - 应变曲线及屈服强度变化。随着加载速度从 1 mm/min 增至 5 mm/min:

0° 取向: 屈服强度持续下降 (218.4 $\rightarrow$ 196.9 MPa, 降幅 9.8%), 变形量显著减少 (48.92% $\rightarrow$ 40.31%, 降幅 17.6%)。 45° 取向: 屈服强度呈现先降后升的非单调变化 (230.1 $\rightarrow$ 227.8 $\rightarrow$ 239.1 MPa), 变形量持续降低 (51.85% $\rightarrow$ 43.08%, 降幅 16.9%)。 90° 取向: 屈服强度逐步递减 (271.3 $\rightarrow$ 253.6 MPa, 降幅 6.5%), 变形量降幅最大 (43.23% $\rightarrow$ 38.15%, 降幅 11.7%)

结果表明, TA1 板材对加载速度表现出显著的敏感性, 0° 和 90° 取向的应变速率效应尤为明显。