

防冰微纳结构进气锥设计制造及性能研究

张少平¹, 张航¹, 谢强¹, 郭会明¹, 张彦², 杨涛³

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500; 2. 南京工业大学, 南京 211816;
3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 航空发动机进气部件结冰是威胁飞行安全的关键问题。针对航空发动机进气锥曲面防冰微纳结构制备, 提出了以液-气-固复合界面稳定、热传递阻断及冰-面黏附弱化为核心的设计策略。分别设计了电沉积高熵合金的三角筋连接封闭微纳结构与激光刻蚀的方柱阵列微纳结构。系统探索了限域电沉积与飞秒激光刻蚀2种工艺在TC4钛合金平板及全尺寸进气锥曲面上的实现途径。通过风洞结冰试验评估了微纳结构进气锥的抗结冰能力。结果表明: 电沉积高熵合金制备的微纳结构存在拼接缝隙, 其平板试样静态接触角为 146.7° , 全尺寸进气锥表面静态接触角达到 153.0° ; 激光刻蚀制备的微纳结构表面均匀性良好, 其平板试样静态接触角为 153.4° , 全尺寸进气锥表面静态接触角达到 152.0° 。两种工艺制备的微纳表面均呈现稳定的超疏水特性。两种微纳结构进气锥均有一定结冰延迟功能, 在同一试验条件下的结冰量低于光滑进气锥。研究成果为突破被动防冰技术在复杂曲面部件上的工程应用瓶颈提供了有效的结构方案与制造范式。

关键词: 航空发动机; 防冰; 微纳结构; 超疏水表面; 激光刻蚀; 高熵合金; 进气锥

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)03-0014-11

DOI: 10.3724/j.GTER.20260023

Design and manufacturing of anti-icing micro-nano-structured inlet cones and their performance study

ZHANG Shaoping¹, ZHANG Hang¹, XIE Qiang¹, GUO Huiming¹, ZHANG Yan², YANG Tao³

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China; 2. Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: The aero-engine inlet cone icing is a critical issue threatening flight safety. Focusing on the fabrication of anti-icing micro-nano structures on aero-engine inlet cones, a design strategy centered on “stabilizing the liquid-gas-solid composite interface”, “blocking solid-liquid heat transfer”, and “weakening ice-surface adhesion” was proposed. Two types of structures were designed: triangular-rib interconnected micro-nano structures fabricated using electrodeposited high-entropy alloys, and square-column array micro-nano structures created via laser etching. Systematic explorations were conducted on the implementation of confined electrodeposition and femtosecond laser etching processes on both TC4 titanium alloy plates and full-size inlet cone surfaces. The anti-icing capability of the micro-nano-structured inlet cone was evaluated through icing wind tunnel tests. Results demonstrate that the electrodeposited high-entropy alloy micro-nano structures exhibit splicing seams, with a static contact angle of 146.7° on flat samples and 153.0° on full-size inlet cones. The laser-etched micro-nano structures show

收稿日期: 2026-02-03

基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2023-006)

作者简介: 张少平(1980-), 男, 陕西眉县人, 研究员、教授、博士, 主要研究方向为航空发动机总体设计。

引用格式: 张少平, 张航, 谢强, 等. 防冰微纳结构进气锥设计制造及性能研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2026, 39(3): 14-24. ZHANG Shaoping, ZHANG Hang, XIE Qiang, et al. Design and manufacturing of anti-icing micro-nano-structured inlet cones and their performance study[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(3): 14-24.

excellent surface uniformity, achieving a static contact angle of 153.4° on flat samples and 152.0° on full-size inlet cones. Both processes exhibited stable superhydrophobic properties. Both micro-nano-structured inlet cones exhibited a certain degree of icing delay capability, and the ice accretion on them was lower than that on the smooth inlet cone under the same test conditions. This research provides effective structural solutions and manufacturing paradigms to overcome the engineering application barriers of passive anti-icing technology on complex curved components.

Key words: aero-engine; anti-icing; micro-nano structure; superhydrophobic surface; laser etching; high-entropy alloy; inlet cone

0 引言

航空发动机结冰问题是威胁飞机服役过程安全的关键隐患之一。在低温高湿的环境下,过冷水滴会冲击进气部件并迅速冻结,导致原始流道轮廓以及气动型面发生改变,从而恶化气动性能、迅速减小推力。严重时,积冰脱落还可能造成航空发动机部件损伤,甚至引发安全事故^[1-4]。因此,高效、稳定的防冰技术是航空工程领域的核心研究方向之一。

目前,航空发动机传统防冰方案主要依赖于引气加热以及憎水涂料。前者牺牲了发动机输出功率,且复杂的引气结构给发动机带来了额外的质量;后者采用有机涂料,质地柔软导致耐冲刷性能较差,其接触角约为 100° ^[5-6],存在疏水防冰效果上限较低等局限性。随着微纳制造技术的飞速发展,基于表面微纳结构的被动防冰技术成为突破传统防冰方案技术瓶颈的重要途径^[7-9]。该技术通过增材或减材的方法在材料表面构筑具备特定形貌与特性的微纳尺度结构,与低表面能修饰手段协同调控防冰功能表面。一方面,微纳结构通过增大液滴与表面的接触角,减小接触面积,来延缓液滴的冻结时间^[10];另一方面,微纳结构通过“空气垫效应”^[11-12]削弱冰层与零件基体的结合强度,减缓冰层的持续累积,最终实现低能耗、高效率的防冰目标,这与航空发动机防冰系统的发展需求高度契合。

针对上述问题,本文以航空发动机进气锥为研究对象,系统开展了设计-制造-验证一体化研究。内容包括:①防冰机理分析与微纳结构筛选设计研究;②电沉积高熵合金涂层增材制造方案以及激光减材加工方案进气锥制造工艺研究;③微纳结构进气锥防冰性能对比验证。研究成果有望突破微纳防冰结构在复杂曲面部件上的工程化应用瓶颈,为航空发动机进气零部件防冰技术提供新型结构方案与制造范式。

1 防冰机理研究与微纳结构设计策略

表面润湿性指液体在固体材料表面扩散、铺展的能力和倾向性,是固体表面的核心特性,其状态由固体材料表面的形貌和化学特性共同决定。基于表面润湿理论,具有表面微纳结构和低表面自由能的疏水表面符合Cassie-Baxter模型描述的润湿状态,表现为静态接触角显著提升,通常大于 150° ,即形成超疏水表面。研究表明,超疏水和防覆冰特性之间存在相关性^[13-14]。在低温环境下,超疏水表面的微纳结构间隙会截留空气,形成稳定的空气腔。其一方面可以大幅度缩减固-液两相的实际接触面积;另一方面因界面上空气导热率较低的特性,显著降低了固体表面与水滴间的热传递效率。以上理论共同构成了微纳结构表面实现防冰功能的核心基础条件。图1示出了微纳结构疏水原理。

为此,根据润湿性理论与防冰机理,本研究所探讨的防冰微纳结构主要围绕液-气-固复合界面稳定、热传递阻断与冰-面黏附弱化三大目标展开,具体设计策略如下。

1.1 针对液-气-固复合界面稳定性的结构设计

针对液-气-固复合界面稳定性的结构设计主要通过拓扑优化实现Cassie-Baxter状态的稳定维持,最大化缩减液-固界面实际接触面积。据此,选择的微纳结构需构建出小于典型环境水滴直径的结构间隙,以尽可能避免水滴渗入间隙破坏空气腔;同时,可采用微纳结构,如微米级柱状/棱柱状突起结合纳米级颗粒或纹理表面修饰,通过控制微米级结构及纳米级修饰的尺寸比例,确保空气腔在外界振动或气流下保持更加稳定的状态。通过上述设计可将液-固界面接触面积占比降至10%左右^[15]。

1.2 针对热传递阻断的结构与材质协同设计

通过优化微纳结构间隙的空气截留效率,强化空气腔的隔热层效应,可进一步降低固-液界面间

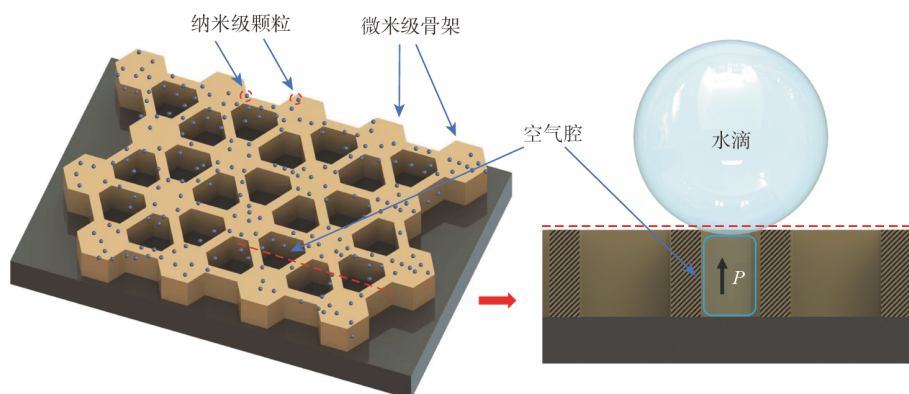


图1 微纳结构疏水原理

Fig.1 Hydrophobic theory of micro-nano structure

的热传递效率,延长水滴冻结延迟时间。从该方向对微纳结构进行设计调整,需加强其结构自身的封闭性以减少空气腔与外界的对流交换,如采用蜂窝状、网格状等封闭性强的微结构单元,通过自身包裹式的结构特性避免低热导率的空气被外界气流带走,持续维持空气腔的低热导环境,从对流层面阻断热传递。

微纳结构基体材料的热传导遵循傅里叶定律:

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

式中: Q 为从基体材料传递至液滴的热量,其值越小,代表隔热效果越好; λ 为微纳结构基体材料的导热系数; A 为微纳结构热传导横截面积; L 为微纳结构热传导路径长度; ΔT 为固-液温度差。当 λ 、 A 、 ΔT 固定时, Q 与 A 成正比。

基于上述理论,微纳结构尺寸设计需平衡微纳结构封闭性以及包裹式结构增加的热传导横截面积。此外,在封闭性微结构的基础上叠加纳米级凸起或纳米纹理,构建的微纳多级复合截留结构有利于阻断热传递。通过“宏观封闭+微观闭锁”的层级结构,增加空气在微纳尺度下的截留量与空气腔留存稳定性,同时细化固-液界面接触时的传热节点,从接触面积与空气截留量双重维度提升隔热效果。

1.3 针对冰-面黏附力弱化的多维度设计

考虑实际工况条件下水滴结冰-累积-脱落的动态循环过程,进气锥表面微纳结构需具备降低表面黏附功的能力,确保冰层易脱落,不累积。该设计目标可通过调整微米级-纳米级复合结构的尺寸梯度,降低实际接触面积,从物理层面大幅降低黏附基

础;同时,引入低表面能化学修饰来降低冰与表面之间的范德华力与氢键作用,进一步实现黏附力的弱化。在防覆冰领域,KULINICH和FARZANEH^[16]系统分析了超疏水表面的冰黏附机制,发现氟碳涂层可将冰-面黏附功降至50 mJ/m²,此时冰层转入弱黏附状态,在风力和轻微振动作用下即可脱落;PAN等^[17]研究表明,通过激光刻蚀+硅烷修饰制备成三级微纳结构,冰黏附功可降至17 mJ/m²,且经50次冻融循环仍能保持稳定。

基于以上设计策略开展了大量不同关键尺寸的工艺验证试验,综合考虑制造工艺的特点及可实现性,分别使用高熵合金电沉积方案和激光刻蚀方案进行加工。

1.3.1 电沉积高熵合金

电沉积高熵合金进气锥采用电沉积增材的方式,在进气锥零件基体表面完成高熵合金层及微纳结构层的定向生长。电沉积系统由伺服电机、电源、进气锥工件、工件随型阳极、微纳结构掩膜、沉积槽组成。电沉积过程中配备有温度控制系统以及高熵合金工作液循环系统来实现沉积过程的稳定性与均匀性,如图2(a)所示。预先将整张掩膜贴合在待加工进气锥工件上,并采用激光光刻的方式将待沉积的微纳结构部分去除,在工件表面形成带有镂空筋连接的三角封闭微纳结构的掩膜。在随型阳极和进气锥工件之间施加脉冲电流,通过旋转平台带动阳极围绕覆盖有微纳结构掩膜的阴极工件旋转。控制旋流速度,实现电极对工件表面待加工区域的扫描。金属离子在阴极得到电子并不断被还原为原子,原子持续堆积在微纳结构掩膜镂空位置形成有序排列结构的沉积层,从而实现微结构阵列在

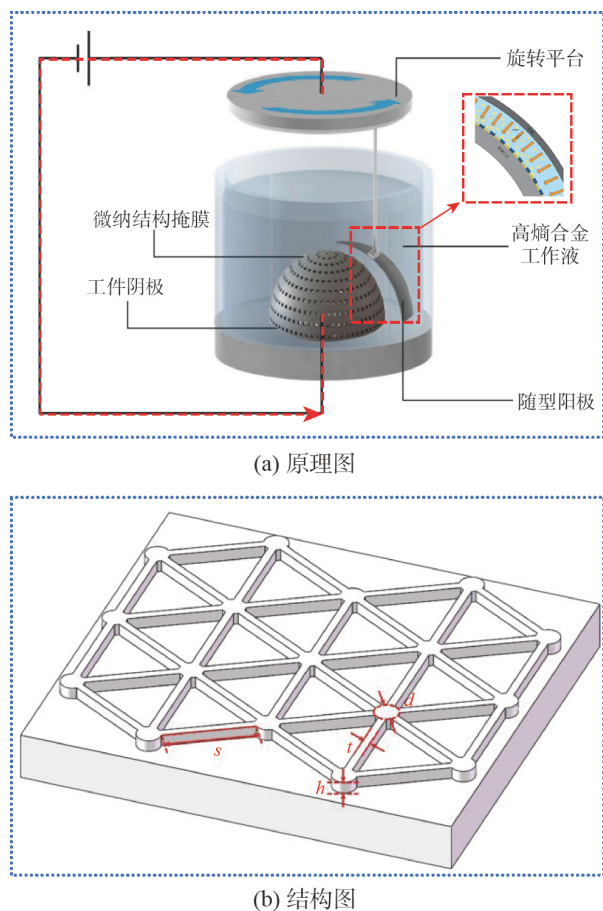


图2 电沉积高熵合金微纳结构

Fig.2 Electrodeposited high-entropy alloy micro-nano structure

工件表面的快速沉积成型。在高熵合金工作液中, Fe、Co、Ni、Cr、Mo各元素质量分数的比例约为 3.5 : 6.8 : 1.0 : 4.7 : 4.0, 溶液的pH值为1.5。主要工作参数为:沉积时间600 s,工作电流 1.5 A/dm^2 ,脉冲频率2 000 Hz,占空比80%。

最终选取筋连接的三角封闭结构,连接节点处采用微圆柱结构,封闭阵列结构三维形貌及尺寸如图2(b)所示。其中,结构高度 h 为10 μm ,筋连接宽度 t 为15 μm ,圆柱直径 d 为30 μm ,阵列结构单元边长 s 为240 μm 。

1.3.2 激光刻蚀

激光刻蚀进气锥采用飞秒激光加工方式,在进气锥零件表面完成基底TC4材料去除以形成微纳结构。飞秒激光加工系统由激光器、冷水机、扫描振镜以及操作软件组成。飞秒激光加工系统输出激光的中心波长为1 030 nm,重复频率为100 Hz,脉冲宽度为500 fs,加工设备及原理如图3(a)所示。预先对所提供的进气锥实物进行激光测量,生成进气锥实物

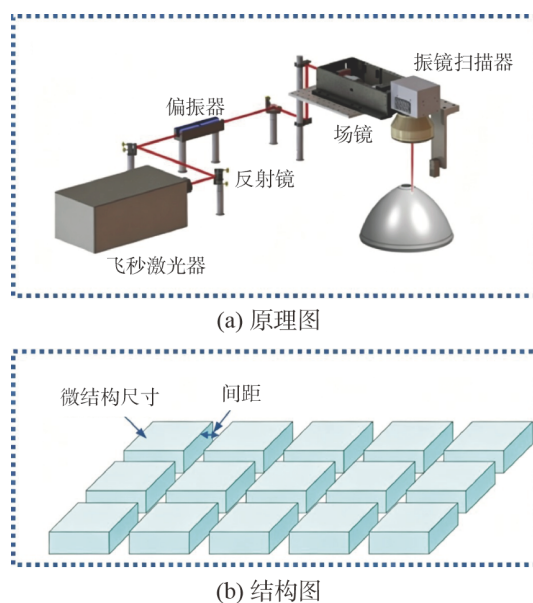


图3 激光刻蚀高熵合金微纳结构

Fig.3 Laser etching high-entropy alloy micro-nano structure

的三维模型;随后依据生成的三维模型,采用超级计算机绘制出带微纳结构的三维进气锥模型,得到加工后的外表面尺寸轮廓模型;再将外表面尺寸轮廓模型导入软件得到激光三维扫描路径;将激光扫描路径和激光器参数导入控制软件进行加工,最终得到预期的结构化表面。制备完成后,将样品依次放入无水乙醇及蒸馏水中分别使用超声波清洗仪清洗10 min,以去除因激光聚焦扫描而沉积在样品表面的烧蚀杂质。

激光刻蚀方案最终选取刻蚀交叉沟槽形成方柱微结构,如图3(b)所示。方柱微结构尺寸为100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,结构深度为90 μm ,结构间距为100 μm 。主要加工参数为:激光器功率18 W,扫描速度200 mm/s,加工次数10次。

2 防冰微纳结构进气锥制备工艺

基于防冰特性的微纳结构设计策略,分别针对增材、减材2种制造方法开展研究。通过电沉积高熵合金涂层、激光刻蚀2种方案开展微纳进气锥的试制工艺探索。2种方案均采用TC4钛合金进气锥零件作为基底零件,完成电沉积高熵合金涂层微纳结构进气锥及激光刻蚀微纳结构进气锥全尺寸件制备。

2.1 电沉积高熵合金涂层方案

2.1.1 电沉积高熵合金平板试样试制及疏水性能测试

基于适应电沉积高熵合金涂层的微纳结构形

式,对筋连接的三角封闭微纳结构尺寸进行优化筛选。其中,关键特征尺寸中的结构高度主要通过限域掩膜的光固化时长控制。已有研究表明,结构高度为10 μm 时,结构稳定性较好;同时,为适应电沉积微结构的质量,选取 t 为15 μm , d 为30 μm ,该尺寸参数下的工艺稳定性较好。

利用限域掩膜电化学沉积法在铜基底上制备Ni-SiO₂微纳复合阵列结构疏水涂层。图4(a)~图4(d)为该涂层不同结构单元边长的扫描电子显微镜图像和静态水接触角。当正三角形排列的单元边长分别为90 μm 、141 μm 、190 μm 和240 μm 时,其静态水接触角分别为124.4°、133.7°、138.5°和146.7°,均呈疏水状态。为此,进气锥全尺寸件的加工尺寸最终选取疏水性能最优的尺寸,即单元边长为240 μm 。由

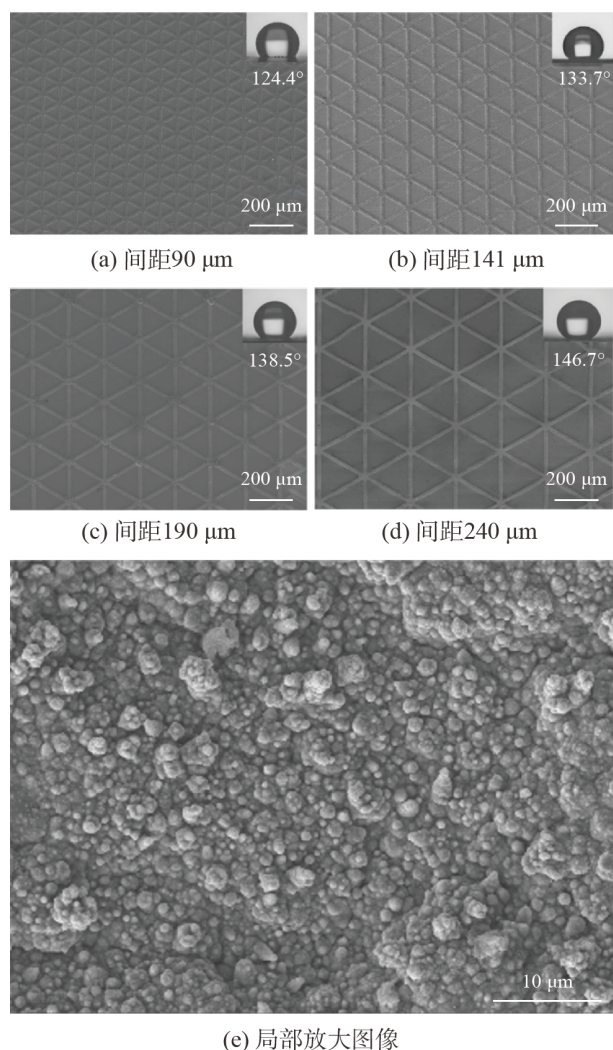


图4 微纳复合阵列结构疏水涂层的扫描电子显微镜图像
Fig.4 Scanning electron microscope images of the hydrophobic coating with micro-nano composite array structure

图4(d)可以看出,电沉积高熵合金制备的圆柱点阵三角筋连接结构轮廓清晰完整,周期阵列尺寸一致性较好,掩膜覆盖区域未见多余物沉积,表明该工艺下制得的微纳结构平板试样表面完整性能够满足设计预期。图4(e)所示的局部放大图像为沉积高熵合金部位的微观形貌。可以看出,沉积表面形貌具有纳米级凸起结构。微米级结构具有较强的鲁棒性,而纳米级结构对空气的黏附作用更强,组合形成的微纳米级复合结构间隙内可利用滞留的空气形成空气阻挡层,阻断液态介质渗透,有利于整体结构的疏水性。

2.1.2 电沉积高熵合金制备进气锥全尺寸件

电沉积高熵合金制备工艺如图5所示。该工艺采用曲面剪纸法,将完整的进气锥曲面划分为多个尺寸一致、形状规则的小区域,依次对各区域进行加工,直至覆盖整个曲面,其分段加工策略如图5(a)所示。在电沉积加工过程中,进气锥作为阴极工件,而经由曲面剪纸法所划分的对应区域作为阳极工件。在电场作用下,电解液中的高熵合金粒子被定向迁移并沉积在进气锥表面,形成均匀的合金镀层。图5(b)进一步展示了剪纸法在实际加工中的顺序流程,即在完成1个区域的沉积后,通过限域薄膜对已加工区域进行遮盖,以有效避免因电场持续作用导致过度沉积,从而保证最终加工表面的均匀性与一致性。

电沉积高熵合金涂层进气锥因采用拼接法加工,受工艺限制,表面存在细微接缝,导致该区域性能与其他部位性能可能不一致。图5(c)示出了拼接处的光学显微镜图像。图5(d)展示了电沉积高熵合金涂层微纳结构进气锥的实物形貌。全尺寸进气锥在加工后的静态接触角达到153.0°,满足超疏水设计要求。

2.2 激光刻蚀方案

2.2.1 激光刻蚀平板试样及疏水性能测试

采用Fluent有限元软件对结构尺寸为100 μm ×100 μm ,结构间距为100 μm ,结构深度分别为50、100、150、200 μm 的微结构表面的液滴润湿行为进行数值模拟。设置边界条件如下:超疏水结构材料设定为钛合金Ti₆Al₄V(密度为4.51×10³ kg/m³),空气密度为1.225 kg/m³,空气黏度为1.79×10⁻⁵ m²/s,纯水黏度为0.001 m²/s,纯水表面张力为0.073 N/m,温度为25 °C,液滴直径为1.6 mm。结果如图6所示,其静态接触角分别为154.0°、145.6°、144.1°、142.7°。

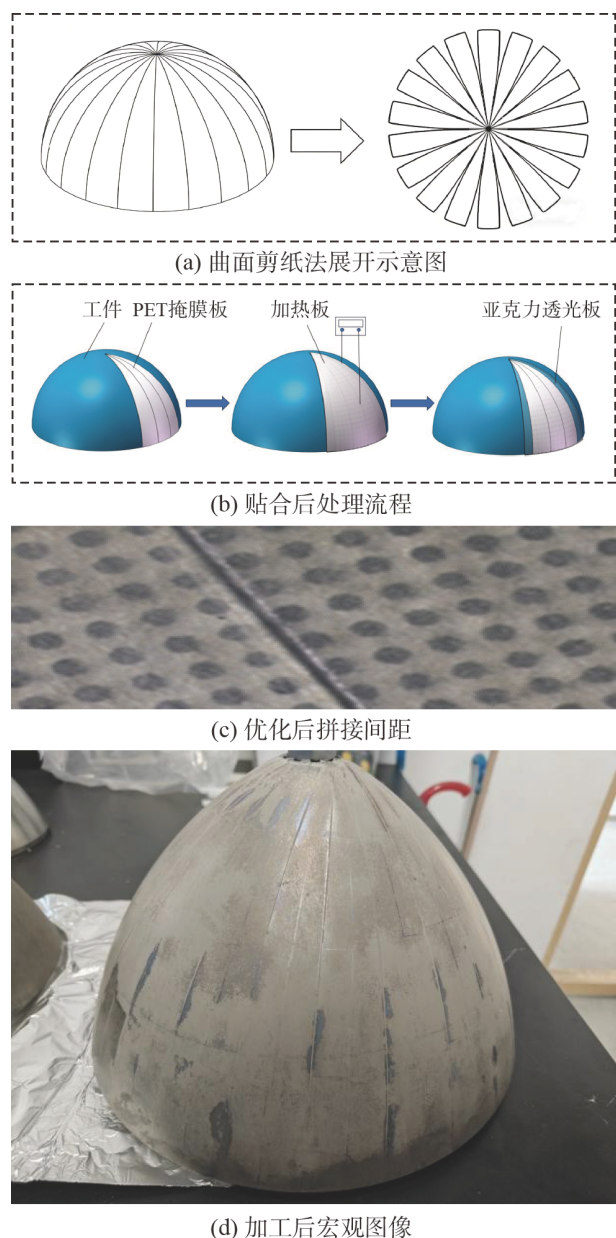


图5 电沉积高熵合金制备工艺
Fig.5 Fabrication process of electrodeposited high-entropy alloys

由模拟结果可知,当微结构尺寸在 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 、结构间距为 $100\ \mu\text{m}$ 、结构深度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,所构造的微结构可以达到超疏水效果。

根据数值模拟结果,在设定结构尺寸为 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 和结构间距为 $100\ \mu\text{m}$ 的情况下,修改激光扫描间距、扫描速度、扫描次数、重复频率等关键工艺参数,开展工艺优化试验。观察不同参数下的微纳结构试样微观组织并测量接触角。图7为不同加工次数下的光学显微镜图像,筛选出组织均匀稳定、无冶金缺陷且疏水性能最优的工艺参数并进行重复验

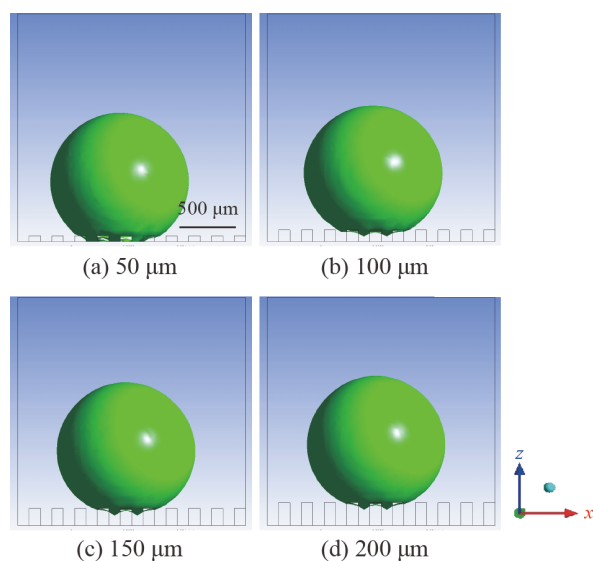


图6 数值模拟结果
Fig.6 Numerical simulation results

证。最终确定激光加工参数为:功率 $18\ \text{W}$,重复频率 $100\ \text{kHz}$,扫描速度 $200\ \text{mm/s}$,扫描次数 10 次。

按照最佳激光加工参数制备的微纳结构平板试样的微观形貌如图8所示。图8(a)为 40 倍扫描电子显微镜的观察结果,可以看出,试样表面方柱状微结构轮廓清晰、形态完整,且整体结构分布均匀,表明该工艺条件下制备的试样符合设计要求。图8(b)为局部放大图像,可以看出,单个方柱结构顶部存在纳米级突起,周围分布有丰富的微米级孔隙。这些顶部的纳米级突起有助于减小液-固界面接触面积,从而增强表面疏水性能;同时,方柱结构底部的大量微米孔隙能够有效储存空气,实现对液滴的稳定托举并抑制其润湿扩展,如图8(c)所示。通过平板试样进行水滴静态接触角测试,多次测量的平均值为 153.4° ,进一步证实其具有优异的疏水特性,如图8(d)所示。

2.2.2 激光刻蚀制备进气锥全尺寸件

进气锥全尺寸件激光刻蚀制备工艺流程如图9所示。该工艺采用激光直写技术,依据预设加工路径实现结构的完整加工。具体流程如下:如图9(a)所示,首先利用三维扫描仪对实际工件进行扫描并生成点云数据,随后通过CloudCompare软件将点云转换为三维结构模型,并对模型进行优化与规整,从而完成实际加工件的三维数字化重建,为后续在超算平台上构建带微纳表面结构的模型奠定基础;如图9(b)所示,基于上述结构模型,将整体模型表面划

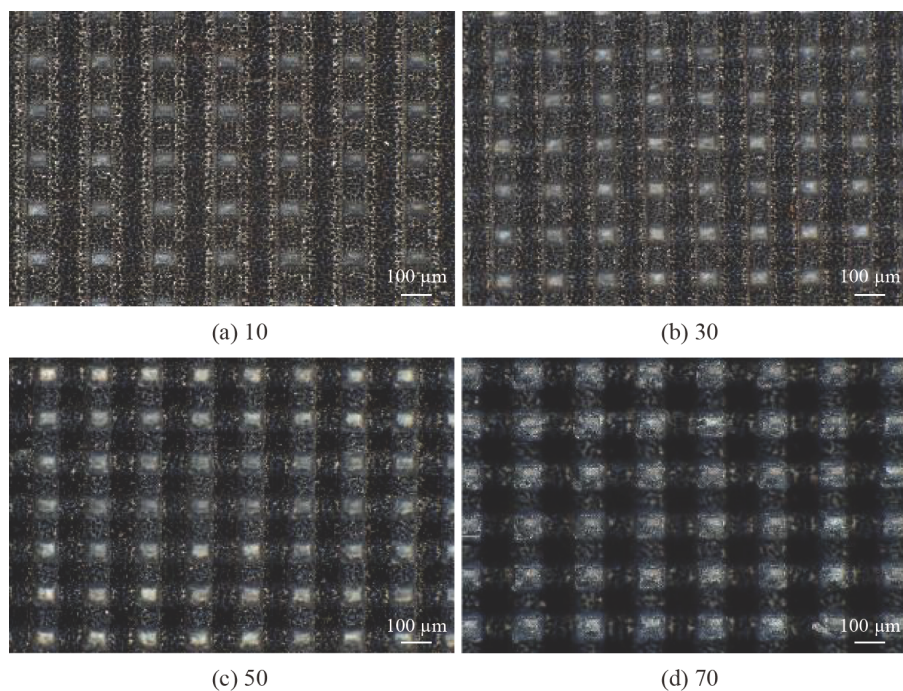


图7 不同加工次数下的光学显微镜图像

Fig.7 Optical microscope images with different processing times

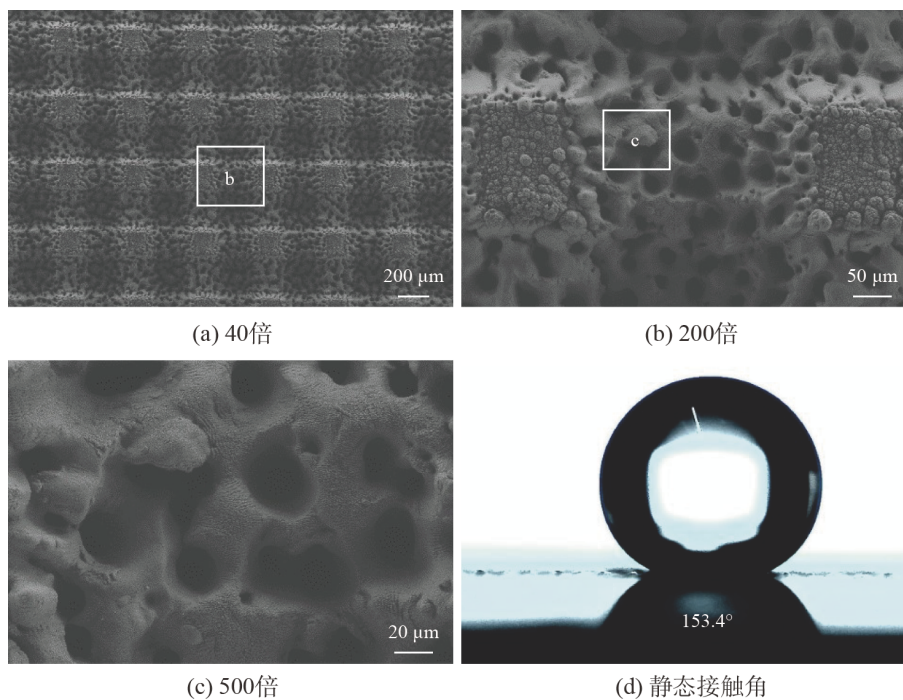


图8 激光刻蚀微纳结构微观形貌与接触角

Fig.8 Laser-etched micro-nano structure morphology and contact angle

分为4个区域,借助超级计算机进行拟合处理,最终将各部分模型整合至进气锥表面,成功构建出具有微纳结构的进气锥三维模型,将该模型导入加工软件生成加工轨迹,并传输至控制系统执行加工;加工

完成后,对进气锥进行再次扫描与建模,得到最终点阵云图,如图9(c)所示。

图10(a)~图10(c)示出了激光刻蚀微纳结构进气锥表面上、中、下3个位置的静态接触角,其数值分别

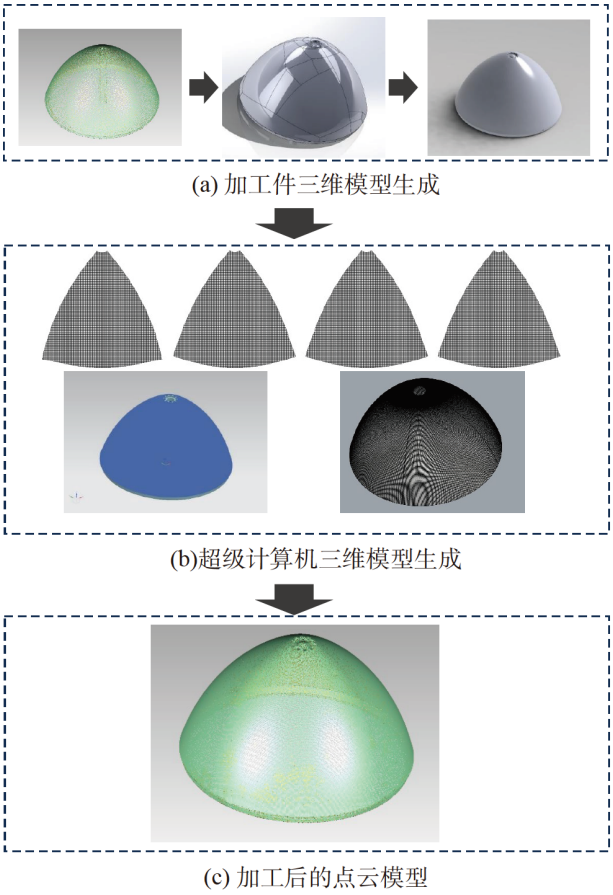


图9 激光刻蚀方案
Fig.9 Laser etching plan

为 154.6° 、 153.9 、 152.4° 。3个位置的静态接触角均大于 150° ,满足超疏水设计要求。图10(d)为激光刻蚀微纳结构进气锥的实物形貌。激光刻蚀成型的进气锥采用一体化加工方式,整体均匀性、一致性较好,有利于实现表面各区域疏水性能的均匀分布。然而,由于飞秒激光加工过程中烧蚀去除限制,部分烧蚀后的金属颗粒未被去除。

2.3 微纳结构进气锥后处理

将微纳结构制件清洗后利用显微镜观察表面形态,确认表面结构的完整性和一致性。采用硅烷化的方式对表面进行疏水处理。硅烷化溶液为全氟癸基三乙氧基硅烷与无水乙醇1 : 100的混合物。将样品放入试剂中浸泡4 h后再放入马弗炉内,加热至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保温40 min进行固化处理,形成最终表面。

3 结冰试验

3.1 试验设备

进气锥全尺寸件的结冰试验在FL-61冰风洞中

进行,冰风洞的结构如图11所示。试验段横截面尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$,长度为 2.7 m 。冰风洞参数指标如表1所示。

3.2 试验件安装

试验对象主要由进气锥、转接段组成。试验件

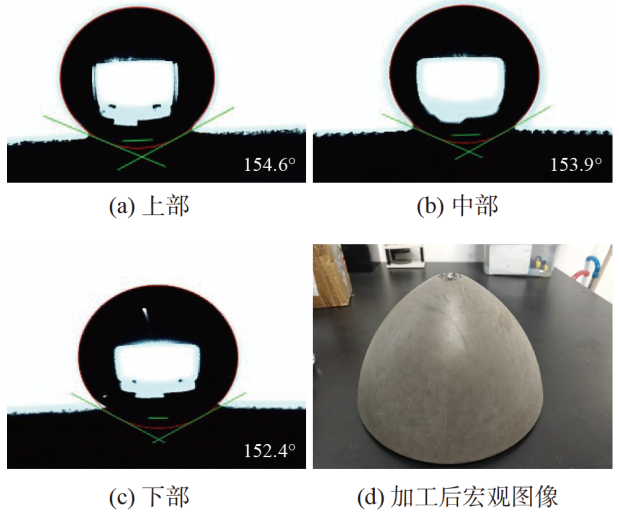


图10 激光刻蚀微纳结构进气锥形貌及接触角
Fig.10 Morphology and contact angle of the inlet cone with the laser etching plan

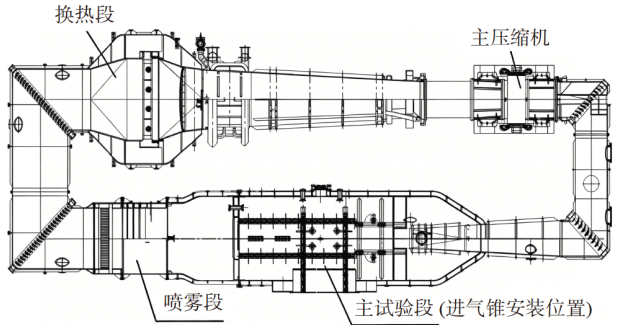


图11 FL-61冰风洞
Fig.11 FL-61 icing wind tunnel

表1 FL-61冰风洞参数指标
Table 1 Parameter index of FL-61 icing wind tunnel

参数	指标	精度
液态水含量	$0.1\sim 3.0\text{ g/m}^3$	$\pm 20\%$
水滴直径	$15\sim 50\text{ }\mu\text{m}$	$\pm 10\%$
云雾场均匀性	20%	—
试验段风速	$0\sim 240\text{ m/s}$	$\pm 2\%$
试验段温度	最低 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
模拟高度	最大 $7\text{ }000\text{ m}$	$\pm 50\text{ m}$
喷雾持续时间	最大60 min	—

安装如图12所示,进气锥通过中间拉杆、法兰以及螺栓固定在中间长轴上。中间长轴一端采用螺栓连接,另一端采用插接,分别固定到风洞试验段壁面。

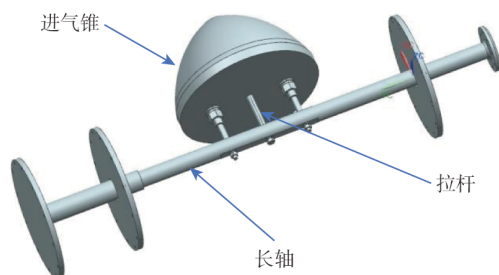


图12 试验件安装

Fig.12 Installation of the test article

3.3 试验过程

对光滑进气锥、激光制备微纳结构进气锥以及电沉积制备微纳结构进气锥开展同参数下的结冰试验。进气锥结冰试验环境参数根据发动机典型结冰工况下的进口气流参数确定,3个试验状态点的环境参数如表2所示。试验目的为评估微纳结构进气锥的防冰能力并获取结冰冰形。首先开展结冰脱落测试。无防冰微纳结构的光滑进气锥按照结冰最恶劣状态(状态点2),喷雾5 min,记录结冰脱落时间 t_1 。若5 min后结冰没有脱落,则所有试验状态点按照3 min时长喷雾并测量冰形;若 $t_1 < 5$ min,则所有试验状态点按照 $0.6t_1$ 时长喷雾并测量冰形。所有结冰过程均录像记录结冰延迟情况。

表2 试验环境参数

Table 2 Test environment parameters

状态点	进口 总压/Pa	进口 总温/℃	风速/(m/s)	液态水 含量/(g/m ³)	水滴 直径/μm
1	101 325	-10	45.8	2.0	20
2		-10	165.3	2.0	
3		-20	162.1	1.0	

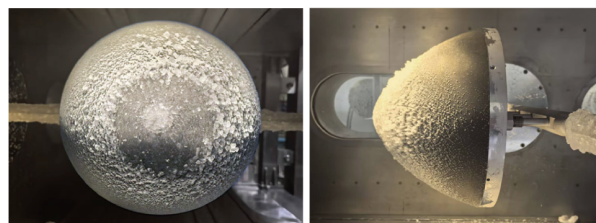
3.4 试验结果及分析

在状态点1条件下进行试验,试验时长均为3 min,结冰情况对比结果如图13所示。结冰试验和结冰冰形结果表明,2种微纳结构进气锥的结冰延迟效果相较于光滑进气锥均有所提高。激光制备微纳结构进气锥的结冰延迟效果略优于电沉积制备微纳结构进气锥。

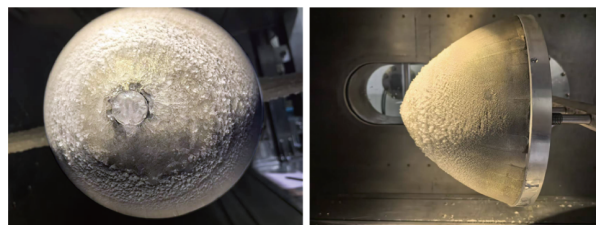
观察各进气锥在状态点1条件下的结冰形貌可



(a) 光滑进气锥



(b) 激光制备微纳结构进气锥



(c) 电沉积制备微纳结构进气锥

图13 不同进气锥在状态点1下的结冰情况

Fig.13 Icing conditions of different inlet cones at operating point 1

知,相较于光滑进气锥,激光、电沉积制备微纳结构进气锥在头部迎风角度较大的区域形成的致密透明的明冰层面积较小,在迎风角度较小的区域形成的质地疏松的碎冰分布更加分散、平整。结合试验的动态过程可知,水雾冲击在微纳结构表面时更容易流动到后段,从而延缓成冰;形成碎冰的过程伴随冰层脱落与成冰的动态平衡,减小了大尺寸积冰脱落的发生概率。在状态点2、3条件下,光滑进气锥、激光制备微纳结构进气锥与电沉积制备微纳结构进气锥的结冰情况基本一致。主要积冰产生在进气锥前端,随试验时间推进,明冰堆积形成柱状突起积冰,后段碎冰不断循环脱落、生长,维持碎冰状态,最终3种进气锥前端均形成了致密的明冰层。其中2种微纳结构进气锥明冰层的形成时间相较光滑进气锥有明显延迟,但明冰层覆盖前端后,积冰形式及进程与光滑进气锥无异。

试验后进行称重对比,状态点1条件下的结冰质量如表3所示。光滑进气锥的结冰质量为94.85 g;激光制备微纳结构进气锥的结冰质量为62.93 g,相较

表3 不同进气锥在状态点1下的结冰质量

Table 3 Ice mass of different inlet cones at operating point 1

试验件	结冰质量/g
光滑进气锥	94.85
激光制备微纳结构进气锥	62.93
电沉积制备微纳结构进气锥	67.92

于光滑进气锥减少了33.7%;电沉积制备微纳结构进气锥结冰质量为67.92 g,相较于光滑进气锥减少了28.4%。该结果与试验后成冰形貌以及试验动态过程一致。以上结果表明,防冰微纳结构可以较为显著地提升结冰延迟效果,并减少结冰质量。

4 结论

(1) 基于液-气-固复合界面稳定、热传递阻断与冰-面黏附弱化三大目标的微纳结构设计,结合低表面能修饰,有效延缓了水滴冻结过程并显著降低了冰层黏附强度。验证了多级微纳结构与材料协同设计在提升防冰性能方面的可行性与有效性。

(2) 分别采用电沉积高熵合金涂层与激光刻蚀工艺,在TC4钛合金平板及全尺寸进气锥曲面上成功构筑了具有超疏水、防冰特性的微纳结构。电沉积法制备的三角筋连接封闭结构与激光刻蚀法制备的方柱阵列结构均展现出良好的形貌完整性和结构均匀性,其平板试样静态接触角最高分别达146.7°与153.4°,全尺寸进气锥表面接触角均超过152.0°,具备稳定的超疏水性能,为防冰功能提供了可靠的表面基础。

(3) 电沉积高熵合金与激光刻蚀2种工艺均能在复杂曲面上实现超疏水微纳结构的制备。其中,激光刻蚀工艺展现出良好的一体化加工能力,所获结构整体一致,曲面适应性良好;电沉积工艺则体现出掩模调控下的结构定向生长潜力。

(4) 电沉积高熵合金与激光刻蚀2种工艺制备的超疏水微纳结构进气锥均有一定的结冰延迟能力。其中,激光刻蚀工艺表现出更好的结冰延迟效果。

参考文献:

[1] BROMFIELD M, HORRI N, HALVORSEN K, et al. Loss of control in flight accident case study: icing-related tailplane stall[J]. The Aeronautical Journal, 2023, 127(1315): 1554–1573.

[2] 万恒成,张爱聆,竺宏杰,等. 飞机燃油系统结冰研究综述[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 143–151.
WAN Hengcheng, ZHANG Ailing, ZHU Hongjie, et al. A review of research on ice formation in aircraft fuel systems[J]. Progress in Aeronautical Engineering, 2024, 15(4): 143–151. (in Chinese)

[3] CAO Yihua, TAN Wenyuan, WU Zhenlong. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 75: 353–385.

[4] PIKE W S. Extreme warm frontal icing on 25 February 1994 causes an aircraft accident near Uttoxeter[J]. Meteorological Applications, 1995, 2(3): 273–279.

[5] LENGAIGNE J, BOUSSER E, BROWN S, et al. *In situ* ice growth kinetics on water-repellent coatings under atmospheric icing conditions[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126136.

[6] ZONG Yuheng, ZHAO Yun, HE Weiwei, et al. Research on the anti-frost performance of hydrophobic TiN-polymer composite coating on aluminum alloy surface [J]. Composites Communications, 2025, 53: 102186.

[7] REKUVIENE R, SAEIDIHARZAND S, MAŽEIKAS L, et al. A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 250: 123474.

[8] ZHOU Hejian, NING Liang, LUO Wei, et al. Self-assembled superhydrophobic coating on the beryllium copper surface with a micro-nano dual-scale structure for anti-icing[J]. Langmuir, 2025, 41(7): 4806–4816.

[9] 张学宝,张少平,王全奇,等. 未来先进航空发动机进气机匣设计方法探索[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(5): 93–102.
ZHANG Xuebao, ZHANG Shaoping, WANG Quanqi, et al. Intake casing design method for future advanced aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(5): 93–102. (in Chinese)

[10] 王 坤,张 彦,王敏龙,等. FSiO₂浓度对强化Fe-Cr-Ni涂层性能的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(5): 57–67.
WANG Kun, ZHANG Yan, WANG Minlong, et al. Impact of FSiO₂ concentration on the performance of reinforced Fe-Cr-Ni coatings[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(5): 57–67. (in Chinese)

[11] XU Jinkai, WU Xinyue, LIAN Zhongxu, et al. Micro-nano manufacturing of Ti₆Al₄V antibacterial surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 625: 126929.

[12] YANG Yu, FENG Junzhe, GUO Zhiguang, et al. Theoretical derivation of the wetting equation for surface micro-nano structures[J]. Colloids and Surfaces A:

- Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 725: 137533.
- [13] ZENG Dan, LI Yong, LIU Hongquan, et al. Superhydrophobic coating induced anti-icing and deicing characteristics of an airfoil[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 660: 130824.
- [14] WU Binrui, CUI Xin, JIANG Huayang, et al. A superhydrophobic coating harvesting mechanical robustness, passive anti-icing and active de-icing performances[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 590: 301–310.
- [15] 周学湫, 汪希奎, 覃冰黎, 等. 超双疏表面的制备及应用进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 5876–5893.
- ZHOU Xueqiu, WANG Xikui, QIN Bingli, et al. Preparation and application progress of superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 41(11): 5876–5893. (in Chinese)
- [16] KULINICH S A, FARZANEH M. Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(18): 8153–8157.
- [17] PAN Rui, ZHANG Hongjun, ZHONG Minlin. Triple-scale superhydrophobic surface with excellent anti-icing and icephobic performance via ultrafast laser hybrid fabrication[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(1): 1743–1753.