

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.06.002

真空电弧离子镀技术的研究现状及发展趋势

陈静华¹, 王海荣¹, 孙保库², 叶贤槐¹, 严力³, 李莉¹

(1. 舟山市质量技术监督检测研究院, 浙江 舟山 316000; 2. 浙江省海洋开发研究院, 浙江 舟山 316021; 3. 舟山久实纳米涂层科技有限公司, 浙江 舟山 316034)

摘要: 真空电弧离子镀是目前最先进、应用最广泛的表面工程技术, 具有镀膜效率高, 绕镀性好, 镀层致密、附着力高, 绿色环保等优点。本文概述了新型电弧源、弧斑运动控制技术和磁过滤装置等控制“大颗粒”缺陷的作用机制与效果; 介绍了基于智能一体化控制系统、精确化在线监控技术的电弧离子镀设备向智能化、大型化发展的趋势; 综述了电弧离子镀与磁控溅射等其他表面处理技术复合沉积、制备纳米结构等高性能复合镀层的最新研究进展。推动真空电弧离子镀技术根据需求向镀层性能更好、工艺更易、适应性更强方向发展, 在更多行业中得到更广泛的应用。

关键词: 真空电弧离子镀; 大颗粒控制; 智能化; 复合沉积技术; 纳米镀层

中图分类号: TQ153; TG174.442

文献标志码: A

Research progress and development trend of vacuum arc ion plating

CHENG Jinghua¹, WANG Hairong¹, SUN Baoku², YE Xianhuai¹, YAN Li³, LI Li¹

(1. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology Supervision, Zhoushan 316000, China; 2. Zhejiang Marine Development Research Institute, Zhoushan 316021, China; 3. Zhoushan Jiushi Nano Coating Technology Co., Ltd., Zhoushan 316034, China)

Abstract: Vacuum arc ion plating is currently the most advanced and widely applied surface engineering technology, featuring high coating efficiency, good over-coating performance, dense and highly adherent coatings, and environmental friendliness. In this manuscript, the mechanism and effect of “large particles” defects controlling technologies are summarized, such as new arc sources, arc spot motion control technology and novel magnetic filtering devices. Intelligent and large-scale trends of arc ion plating equipment based on intelligent control system and precise online monitoring technology are reviewed. The up-to-date research progresses on hybridizing with other surface treatment technology and high-performance composite coatings are presented. The vacuum arc ion plating technology will develop in the direction of better performance, easier process, stronger adaptability, and wider application based on the demands.

Keywords: vacuum arc ion plating; large particle control; intelligentization; hybrid deposition techniques; nano coatings

收稿日期: 2025-06-10 修回日期: 2025-08-13

作者简介: 陈静华(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程材料研发, e-mail: cjh0580@163.com

通信作者: 孙保库, e-mail: 61949224@qq.com

基金项目: 舟山市基础研究科技项目(2024C31067)

引用信息: 陈静华, 王海荣, 孙保库, 等. 真空电弧离子镀技术的研究现状及发展趋势[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(6): 15-24.
CHENG Jinghua, WANG Hairong, SUN Baoku, et al. Research progress and development trend of vacuum arc ion plating[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(6): 15-24.

真空电弧离子镀又叫多弧离子镀,是在真空蒸镀和真空溅射基础上发展起来、最新、最先进的表面工程技术之一^[1]。其基本原理^[2]是将镀膜材料制作作为阴极靶,冷场致弧光放电在靶面产生高速运动的阴极弧斑,直径不大于100 μm 但电流密度高达 $10^7 \sim 10^9 \text{ A/m}^2$ ^[3],瞬间把靶面金属元素电离为离子并溅射出来,然后在负偏压的作用下直接沉积在基体表面或与 N_2 、 O_2 、 C_2H_2 等气体反应生成化合物沉积在基体表面形成薄膜^[4]。其工艺特点如下:

(1) 以阴极靶材作蒸发源,无熔池。且一弧多用,既是蒸发源和离子源,又是加热源和离子溅射清洗的离子源,与其他物理气相沉积设备相比结构简单、成本低。

(2) 靶材安装灵活,可以根据实际需求任意设置于镀膜室适当位置,每个靶材即可单独工作也可联合工作,镀膜效率高、绕镀性好,并可简化基体转动机构。

(3) 金属离化率高达80%以上,镀膜致密,均匀,附着力、性能优异。

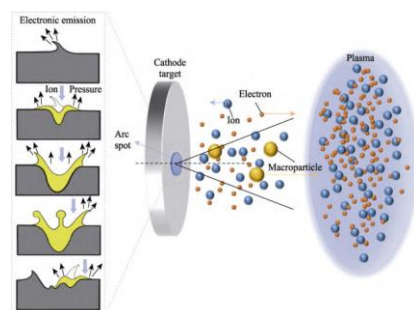
(4) 真空度高,不引入有毒气体,也不会生成有害气体和废物,与电镀、化学镀等传统镀膜工艺相比无污染无公害^[5]。

随着新兴战略产业的崛起,高端制造业的发展,对节能环保、可持续发展的高性能镀膜技术需求旺盛。据市场研究机构QYResearch统计,2022年全球电弧离子镀膜机市场规模约45亿美元,预计到2027年将以每年8.3%的复合增长率增长至67亿美元;2022年国内市场规模约120亿元,预计到2027年将以每年9.8%的复合增长率增长至200亿元。本文从大颗粒缺陷控制,智能化、大型化真空电弧离子镀设备,复合强化处理技术和复合膜层结构设计等方面总结了最新研究进展,有望推动真空电弧离子镀在更多行业中得到更广泛的应用。

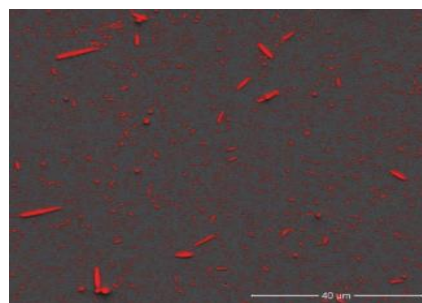
1 镀膜大颗粒缺陷控制技术

自身存在的“大颗粒”缺陷是限制电弧离子镀应用和膜层性能提升的关键技术瓶颈^[6]。其产生过程和CrN镀层表面大颗粒经IPP软件处理后的典型SEM照片如图1所示。靶材经弧斑瞬时高温作用,内部和外表面产生压力差,向外发射金属原子蒸汽,大部分成分在高温等离子体作用下被电离,部分未能完全电离的成分以零点几微米到几十微米^[7]的熔融态大颗粒形式存在,并以100~800 m/s速度飞向基材,沉积在薄膜中导致各种缺陷进而影响应

用性能。目前主要从源头减少或消除大颗粒的产生、向基体飞行过程中过滤大颗粒等方面出发改善大颗粒污染问题。



(a) 宏观大颗粒形成模型^[8]



(b) CrN 薄膜表面大颗粒的典型 SEM 照片^[9]

图1 宏观大颗粒形成模型和 CrN 薄膜表面大颗粒的典型 SEM 照片

Fig.1 Formation model of macro-large particle and typical SEM image of macro-large particles above CrN coatings

1.1 基于大颗粒产生机制的缺陷控制技术

阴极电弧蒸发源是电弧离子镀技术制备高质量镀层的核心技术,降低弧斑在某一点的停留时间,降低局部热量,可从源头上抑制大颗粒的产生。

1.1.1 新型电弧源

脉冲技术是改善多弧离子镀层质量,研制新电弧源的重要方向^[10]。相对于常规直流电弧源,第一个优点是电弧放电是脉冲式、间断的,一般只有 $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}$ ^[11],可充分导走放电产生的热量;其瞬时能量大,弧根数目更多,半径更大,受热更均匀,如图2(b)所示^[12],避免出现局部微小熔化而产生熔滴影响膜层质量。第二个优点是基底不需要加负偏压,因而不会产生基底负偏压放电。聂军伟等^[13]发明了一种等离子体射流触发脉冲阴极弧源,利用脉冲等离子体产生炬产生的脉冲射流为阴极电弧靶点火,结合阴极弧靶上脉冲电压和功率调节,控制阴极弧能量,抑制电弧等离子体中含有的大颗粒缺陷,同时利用阴极弧靶和脉冲等离子体炬移动或转动,来实现阴极靶的均匀烧蚀和高均匀性膜层镀

制。Frolova等^[14]在讨论电源电路的设计、工作原理、特点以及等离子体源的主要参数与真空电弧脉冲参数关系的基础上,设计了超音速等离子体流的脉冲电弧源,真空电弧电流振幅为25 kA时,产生的等离子体密度为 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。赵栋才等^[15-16]发明了瞬时电流高达上万安培的多级触发脉冲电弧源,并室温条件下制备了掺氮Ta-C镀层,摩擦系数0.14~0.15,综合性能优异。步天龙等^[17]通过脉冲电弧离子镀在不锈钢基底上沉积了结合力强的纳米氧化锌压电镀层,为新型永久薄膜压力传感器在高压及超高压智能套管压力监测领域的应用提供了科学参考及依据。

分裂弧是最新开发的新弧源,将原来较大的弧斑分裂为数个细小弧斑,在靶材表面产生更均匀的

电弧等离子体,减少大颗粒的产生^[18],如图2(c)所示^[19]。Zhang等^[20]探讨了真空电弧阴极斑点运动中微黑子分裂特性,微黑子的连续自分裂特性在间歇性微爆发射机制下不稳定,会周期性分裂合并,通过调节沉积参数可以相对提高微黑子分裂的稳定性,但无法改变直流电弧下周期性发生相对集中放电现象的本质,为分裂弧源的研发提供理论基础。Lang等^[21]开展了脉冲阴极真空电弧微点分裂特性研究,发现叠加在直流电弧放电上的强脉冲电流可以促进电弧斑点分裂,脉冲峰值处的微斑分裂呈现出多级环形膨胀现象,其膨胀半径随着峰值电流的增加而增加,电弧源磁场横向分量的增加使微点分裂模式逐渐从环形膨胀变为弧形膨胀,脉冲频率的增加导致小孢子分裂的范围逐渐减小。

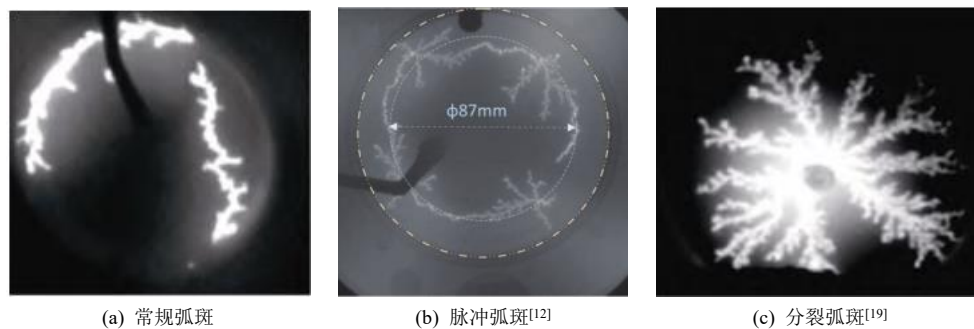


图2 不同弧斑形貌

Fig.2 Spot morphologies of different arcs

1.1.2 弧斑运动控制技术

弧斑运动控制电弧放电,其运动轨迹严重影响大颗粒缺陷的产生^[22]。为了快速、精确调控靶材表面弧斑,有效减少大颗粒的产生,提高靶材的利用率和镀膜稳定性,国内外对弧斑的运动特性开展了大量研究^[23-24],提出了“半经验流体动力学模型”、“电荷受力漂移模型”和“半经验模型”^[25]等诸多弧斑形成及运动理论。并自20世纪80年代伴随着磁控电弧蒸发离子镀技术的诞生而开发了众多磁场控制弧斑运动技术^[26]。磁体源由永磁体发展为电磁线圈,磁场由横向、轴向和尖角等单一静态磁场发展为控弧效果更优异的复合磁场、动态磁场和复合动态磁场^[27]。

复合磁场控弧技术将电磁场与永磁场机械结合,弧斑在横向磁场下做反安培力加速运动的同时,运动范围被轴向磁场约束,在靶面范围内做旋转往复运动。其中轴对称复合磁场是发展比较成熟、得到广泛应用的控弧技术。刘野等^[28]开发了永

磁体或碳素钢与电磁线圈共同对弧靶表面磁场产生作用的新型复合磁场结构,调整极为方便,产生的磁场形状较好,可以有效提高靶材烧蚀效率,改善成膜质量。乔宏^[29]设计、模拟、优化了“电磁+永磁”形式复合轴对称磁场,探讨了复合磁场对弧斑运动、大颗粒产生、靶材利用率的影响。Cho等^[30]发明了由围绕电弧靶的阳极和下方环形永磁体组成的中心凹陷磁场,在没有电磁铁等多个附加装置的情况下限制电弧向靶材中心运动。

动态磁场控弧技术通过动态地变换磁场在靶面的局域性分布,扩大磁场横向分量的面积,扩大弧斑运动区域,有效去除大颗粒,提高靶材利用率,可以分为机械式和电磁式^[31]。潘家敬等^[32]发明了一种磁场辅助阴极电弧离子镀蒸发源装置,通过极靴和永磁体的纵向旋转、整个装置的横向旋转使得电弧在靶面均匀分布,加速弧斑移动速度,减少液滴或大颗粒的形成,细化弧斑,细化膜层组织,最终提高膜层质量。周敏等^[33]公开了一种弧源磁场的动

态调节方法,在靶材一侧沿宽度方向依次间隔设置多个电磁线圈,依时序控制不同电磁线圈的电流通断,使产生的磁场相对于靶材宽度方向往复运动,同时对选定为导通状态的电磁线圈施加周期性正负脉冲变化的电流,使弧斑具有垂直于靶材宽度范围内的往复运动,提高靶材利用率。Wang等^[34]通过施加扫描径向磁场把弧斑运动限制在表面的螺旋轨道上,更大的移动面积和更快的移动速度降低了阴极表面温度,减少了大颗粒的发射。

复合动态磁场控弧技术是对不同形式磁场独立分析结果的复合运用,以实现尽可能扩大弧斑刻蚀面积的同时限制弧斑运动范围的理想磁场。Okazaki等^[35]发明了一种由辅助永磁体配合安装在旋转平台上的环形永磁体产生控弧磁场的技术,开启旋转平台后可产生绕靶材中心转动的环形运动弧斑,均匀刻蚀整个靶面。朗文昌等^[36]在分析了不同波形励磁电流条件下磁场对弧斑运动影响的基础上,设计了一种由反极性动态聚焦导引磁场与轴对称发散磁场或者拱形磁场叠加而成的多模式交变耦合动态磁场,反极性聚焦导引磁场把弧斑约束在靶材中心,轴对称发散磁场推动弧斑向外扩展,轴对称拱形磁场将弧斑约束在固定的轨道,可以动态的控制弧斑运动,改善弧斑放电状态,减少大颗粒发射,其电弧离子镀弧源装置及15 Hz正弦模式下弧斑的放电形态如图3所示。蒋钊等^[37]公开了一种磁路可控式真空阴极电弧离子源,磁轭由具有顶面的圆筒形磁轭A和圆环形磁轭B组成,磁轭B装在磁轭A内部,且两者接触,磁轭A与电弧离子源壳体之间为自由公差配合,可沿电弧离子源壳体滑动,通过调整磁轭位置可以调节阴极靶面的磁场强度,同

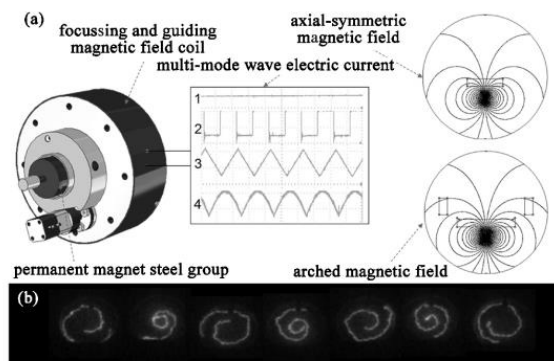


图3 多模式交变耦合磁场辅助电弧离子镀弧源装置及弧斑放电形态图^[36]

Fig.3 Schematic diagram of arc source assisted by multi-mode AC magnetic field and the arc spot motions^[36]

步优化阴极靶面的磁场位形分布。Jun等^[38]发明了一种线性致动器用于前后线性移动设置在电弧源后表面上的磁场产生设备,保持靶材表面的磁场恒定,实现弧斑运动速度和靶材蒸发率恒定。

1.2 基于大颗粒带电特性的缺陷控制技术

磁过滤技术是目前控制大颗粒缺陷最有效的方法,基本原理^[39]是利用等离子体与大颗粒具有不同荷质比,在运输过程中通过电磁场来控制等离子体空间分布和运动方向,通过“屏障”(挡板或弯管壁)到达基体,而沿直线运动的大颗粒被阻挡,从而实现过滤大颗粒的目的,理论上效率可达100%,如图4所示。

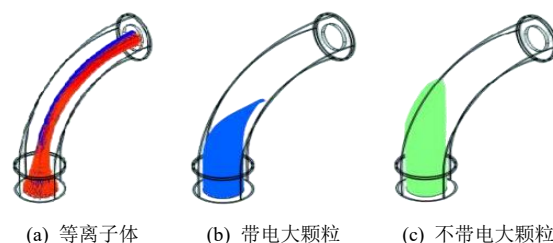


图4 不同粒子在90°弯管磁过滤装置中的运动轨迹^[40]

Fig.4 Trajectories of different particles in 90° duct filter^[40]

兼顾大颗粒过滤效果和离子传输效率的新型装置一直是研究人员关注的焦点。马震宇等^[41]发明一种角度为90°的多弯管磁过滤装置,弯管上依次设置由聚焦线圈、引导线圈、引出线圈,可通过控制线圈电流有效过滤杂质和大颗粒。黄杰等^[42]设计了“Y”型三通管磁过滤装置,由2个支线管和1个干线管组成,实现了多元复合膜层的组分调控。Kim^[43]设计了带有电极触发控制器的磁场过滤装置和电弧源,当电弧靶蒸发产生的管道电流小于规定值时,电弧源和磁场过滤装置系统将启动,达到长时间稳定运行的效果。朗文昌等^[44]通过设置旋转磁场发生装置,在过滤管道出口端内腔区域形成可调旋转磁场,引导离子束以不同的偏转角度和旋转速度离开过滤管道进入真空镀膜室腔,大大增大了镀膜面积和均匀性。赵栋才等^[45]公开了一种线圈电磁挤压式磁过滤装置,由安装在偏转室与真空室连接处两侧的第一、第二偏转线圈构件和电弧阴极外部的聚焦线圈组成,第一、第二偏转线圈构件形成的磁场方向相反,N极均指向偏转室,且与聚焦线圈形成的磁场方向垂直,等离子体通过时,受到磁力挤压完成从电弧源阴极至真空室的偏转,过滤掉大颗粒。

2 真空电弧离子镀设备

随着工业4.0概念的普及和实施,越来越多的企业开始追求生产过程的自动化和智能化,以提高生产效率、降低生产成本、保证产品质量。智能化、大型化的真空电弧离子镀设备成为研究热点和发展趋势。

2.1 智能化电弧离子镀设备

(1) 控制系统的智能化

从手动单回路控制系统,逐渐发展到PLC可编程过程控制系统,再到智能一体化控制系统。PLC可编程过程控制系统是目前市场上真空电弧离子镀设备广泛应用的控制方式,一般由上位机和下位机组成。

上位机主要采用工业PC,实现工艺参数配置、运行过程监控、系统管理和运行日志等;下位机通常采用PLC,实现工艺流程的控制等功能。智能一体化控制系统一般应用于高端设备,由一体化触摸屏计算机、可编程逻辑控制器以及网络接口组成。机内储存若干种典型的镀膜工艺及配套的过程参数控制软件,施镀过程中,系统根据输入的工艺参数,自动调用相应的过程参数控制软件进行智能一体化控制,系统可靠性高,控制效果好。

杨素霞等^[46]通过PLC和LabVIEW软件协同设计了操作系统为Windows XP,数据库为SQL Server的智能化控制系统,具有操作方便,控制精度高,可扩展性强等优点,很好的降低了能耗和污染。康豪^[47]选择基于C/S模型的上下位机硬件控制结构和基于Lab Windows/CVI的软件开发环境,采用模块化的软件设计方法,开发了真控镀膜设备控制系统,为了技术人员和运行人员进行高质量薄膜产品的设计和生提供了极大的便利。李敬^[48]采用PLC、终端、GUI和网络等编程技术编写了相关程序,实现了过程控制、PT的显示与通信、上位机的UI界面与流程监控和上位机与PLC的Fins通信等功能,打造一套真空离子镀膜设备的计算机监控系统,大大提升了生产效率和产品质量,为工业界计算机监控系统的设计开发提供了宝贵经验。

(2) 镀层厚度等在线监控技术的精确化

由较早使用的触针法、天平法等机械方法发展为光谱、超声波、脉冲激光等众多类型,监控精度普遍提高到约为0.025%,最优可达0.01%左右^[49]。Mahmudur等^[50]通过探讨脉冲激光加热铝基材表面产生的超声波在垂直于薄膜表面的传播时间与厚

度的关系,开发了薄膜厚度在线监测系统。Dong等^[51]采用引入锁相放大器电流和单膜反射系数的贵族算法研制了一套红外光学膜厚监测系统,实现了对红外薄膜的精确监控。杜昕等^[52]基于光的干涉以及光学薄膜设计理论,采用光电极值法构建数学模型,研发一种应用于真空镀膜设备的覆盖可见光-红外波段的宽光谱光学膜厚监控系统,误差小于0.01%,进一步提升了控制精度以及镀膜效率。冯森等^[53]利用视觉相机对脉冲电弧离子源亮度进行实时监测,并根据监测结果自动调整镀膜过程,提升镀膜工艺稳定性和精度。

(3) 部件运行的自动化程度越来越高

自动上料、自动输送装置已成必备部件^[54],为了满足特殊需求,电弧源的自动化移动方案也越来越多。王娜等^[55]发明了一种新型内表面电弧离子镀的制备方法,通过阴极弧源电磁场控制系统控制弧斑上下匀速螺旋运动,转动机构带动工件旋转运动,有助于提高钼、铌等超高温防护涂层的服役稳定性和可靠性。秦工等^[56]为了适应不同厚度规格材料的施镀需求,发明一种自动调整离子束溅射角和入射角的离子镀装置及方法,竖推杆驱动溅射座调整高度,斜推杆驱动溅射片的倾角发生变化,转盘带动工件旋转。

2.2 大型化电弧离子镀设备

为应对资源短缺、气候变化等全球性挑战,缩短生产周期,节能降耗是必然选择,能满足大尺寸工件或大装炉量小尺寸工件的大型真空电弧离子镀设备和技术成为发展趋势。

如苏尔寿公司开发了最大装载重量达2 700 kg,最大装载长度达4 000 mm,最大装载直径达1 600 mm的PVD装置。贾工普等^[57]为了满足6 m长不锈钢管的镀膜需求,采用行星轮系实现工件的轴向移动,采用计算机实现自动化控制,成功研制了中国第一台大型卧式真空离子镀膜机。李国军等^[58]针对不锈钢饰板的镀膜需求研发了大直径的立式电弧镀膜机,直径由1.8 m增大至3.8 m,同时为了节约能耗、提高工作效率,在不增加电弧源数目的基础上优化了其分布,设计了炉底、炉顶进气压头相互补偿的供气方案。孙博宇等^[59]发明了一种用于超长叶片多弧离子镀膜的组合作业方法和方法,操作简便、生产效率高,能实现缘板和叶冠局部防护,用于多弧离子镀膜机进行热障镀层涂覆。Cho^[60]为提高长管件表面施镀时靶材利用效率,发明一种专用大型电弧离子镀系统。

3 复合镀膜技术研究

随着真空电弧离子镀膜技术应用范围越来越广,功能要求越来越多,质量要求越来越高,传统的真空电弧离子镀制备的单层多元镀层越来越不能满足要求。因此,规避单一沉积技术固有缺陷的复合沉积技术,功能梯度多层和纳米结构等高性能复合镀层成为当前研究热点。

3.1 基于真空电弧离子镀的复合沉积技术

电弧离子镀/磁控溅射复合沉积技术是目前关注最广泛、可商业化应用的复合沉积技术,拓宽了硬质镀层成分与结构设计的可能性。Vetter等^[61]开发了电弧离子镀与高功率脉冲磁控溅射复合沉积技术,基于高功率脉冲磁控溅射的脉冲宽度、脉冲波形以及电流密度均可独立调节,该技术具有丰富的工艺可拓展性。Li等^[62]为增强膜基结合力,采用磁控溅射和多弧离子镀相结合的方法制备了FeCrAlTiSi高熵合金非晶态镀层,在3.5 wt.% NaCl水溶液中腐蚀电流密度相对于316L不锈钢提高了约60倍。Hae等^[63]在用于柔性钙钛太阳能电池(FPSC)的无色聚酰亚胺(CPI)基板上,采用直流磁控溅射(DMS)和电弧离子镀制备了高性能的柔性SITO/AITO电极,比传统的AITO/SITO电极表现出更优异的机械柔性和耐用性,更高的功率转换效率。武晨阳等^[64]针对火炮身管内膛磨损严重的问题,采用磁控溅射/多弧离子镀复合处理工艺,制备了TiAlYN镀层,膜基结合力最大为54 N,摩擦因数最小为0.4,为火炮身管耐磨延寿提供了理论及实践基础。张权等^[65]开发了电弧离子镀/磁控溅射复合沉积技术,制备出高硬度、高结合力以及内应力可控的AlTiN复合镀层以及AlTiN/AlCrN复合镀层,在难加工材料的高速干式切削中表现出显著的抗磨损优势。

同时,国内外学者开展了大量电弧离子镀与其他表面处理技术的复合强化处理技术。Xie等^[66]采用强流脉冲电子束(HCPEB)对电弧离子镀NiCoCrAl镀层进行了改性处理,在1 373 K温度下表现出更强的抗氧化性能,更高的热稳定性。刘耿明等^[67]为提高Zr合金包壳表面镀层的抗高温氧化性,采用多弧离子镀加激光微熔(LMM)的复合技术在Zr合金包壳表面制备Mo/NiCr镀层,出现出非平衡凝固组织特征,空隙率减少。Ramírez-reyna等^[68]在4140钢表面进行氮化处理后制备AlCrN、Fe_xN和AlCrN/Fe_xN镀层,镀层失效模式由黏结变为内聚,

Fe_xN镀层降低了基体与AlCrN镀层间的性能差异,提高了基体与镀层间的结合力,表现出最佳的耐磨性。祝绳健^[69]探讨了YG8硬质合金表面纳米化处理对多弧离子镀TiAlN膜层的影响,在纳米化处理表面制备的TiAlN膜层厚度更大、硬度增加了约24.3%,结合力增加了约35.23%。

3.2 基于真空电弧离子镀复合膜层结构设计

3.2.1 功能梯度多层镀层

功能梯度多层镀层是借鉴梯度材料的概念,施镀过程中通过逐步改变镀层生长方向元素成分含量,或者逐渐过渡到另一种化合物制备的具有化学组分梯度、晶粒尺寸梯度或硬度梯度等其中一种或几种的镀层^[70-71]。镀层两侧具备不同的性能,有效减少了镀层由于晶格常数不同导致热胀系数差异带来的热内应力,具有比其中任何单一镀层更优越的结合力、综合应用性能和使用寿命。Musa等^[72]研究了沉积在AISI A8工具钢上AlTiCrN单层镀层、AlTiN/AlTiCrN双层镀层和AlTiN/AlTiN/AlTiCrN这3层镀层的摩擦学行为,发现3层镀层基于更高硬度、抗断裂性、更好黏附强度和更低表面粗糙度的协同效应,磨损率分别比两层和单层镀层降低了15%和29%。杨通晗等^[73]采用真空阴极电弧离子镀技术在W6Mo5Cr4 V2高速钢表面分别沉积周期数为6、10和14的Ti/TiN/Zr/ZrN多层膜,发现随周期数增加,Ti/TiN/Zr/ZrN多层膜的硬度、弹性模量和韧性增大,耐磨性和耐蚀性变好。Wang等^[74]采用有限元方法对比了电弧离子镀制备的Cr/CrAlN和梯度Cr/CrN/Cr/CrAlN镀层,结果表明梯度镀层具有更少的表面颗粒,更高的结合强度和更好的纵向、横向应力耗散能力。林嵩^[75]创新的提出了成分-结构尺度-弹塑性能的梯度设计理念,采用多弧离子镀技术制备了具有自润滑性能的梯度纳米TiSiCN镀层,梯度结构有效减少了普通TiSiCN镀层缺陷,提高了H/E与H₃/E₂值,提升了韧性。孙日等^[76]利用电弧离子镀技术在DZ125合金表面分别沉积NiCrAlY/NiAl//Al镀层、NiCrAlY/Pt/NiAl/Al镀层,再经真空扩散退火处理形成成分渐变的梯度镀层结构,通过对比2种镀层体系在900 ℃不同混合盐中的热腐蚀行为发现Pt层抑制了Cr、O元素的外扩散和内扩散,显著提升了NiCrAlY涂层在混合盐中的抗热腐蚀能力。

3.2.2 纳米结构镀层

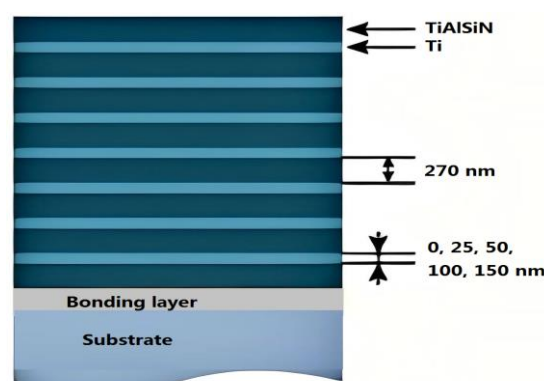
纳米结构镀层是指核心材料为纳米级颗粒组成的镀层。当材料尺寸小于100 nm,尤其在10 nm左右会产生小尺寸、界面、宏观量子 and 比表面等众多

奇异效应,大大提升材料性能,因此相对于普通镀层,纳米结构镀层表现出更优异的硬度、韧性、耐磨擦性能和耐腐蚀性能等^[77]。并根据结构和制硬机理的不同分为纳米多层镀层和纳米复合镀层。

纳米多层镀层是指两种或几种纳米级的不同材料镀层周期性交替生长而成的多层镀层,如图5(a)所示。调制层形成的共格界面增大了界面间的位错密度,有效阻碍了位错穿过界面传递,相互交替的不同成分和结构有效减小了膜层中的孔洞,大量界面多层结构有效阻碍了微裂纹等缺陷在膜层内部的移动,因此相对于单一组份镀层,纳米多层镀层硬度更大、耐蚀性、韧性、摩擦磨损性能更优。Cheng等^[78]以Ti/TiN纳米多层镀层为模型系统,研究了异质界面结构对弹性、塑性变形和磨损行为的影响,表明大多数层厚为10~80 nm纳米的多层膜的硬度、模量与层厚成反比,与界面梯度无关,层厚恒定时,磨损率与界面梯度厚度成反比,证明控制纳米级界面结构是增强磨损的有效方法。Liu等^[79]采用电弧离子镀技术制备了纳米级单层TiAlSiN、AlCrN和多层TiAlSiN/AlCrN镀层,发现多层TiAlSiN/AlCrN镀层的弹性模量、纳米硬度等性能介于两种单层镀层之间,符合“混合定律”,同时由于多层镀层的界面效应,多层TiAlSiN/AlCrN镀层的残余应力最小,500和800℃时的耐磨性能均最优。赵升升等^[80]采用电弧离子镀技术制备了不同调制周期的ZrN/TiCuN纳米多层镀层,发现界面处存在大量共格结构,且连续贯穿几个相邻镀层,随着调制周期减小,共格结构的界面增加,纳米单层厚度变薄,硬度提高,在调制周期最小时硬度达到最大值 3.15×10^4 MPa。

纳米复合结构镀层是指把凝聚的晶体相或无定型复合相弥散在传统的单层镀层中而形成的结构。从Veprek等^[81]提出的晶粒大小为3~10 nm的纳米晶被1~2 nm的非晶层包裹的理想模型,如图5(b)所示,可看出纳米复合结构镀层具有较高的共格界面能,不同相之间界面结合牢固,可以提升镀层韧性;非晶相对位错的运动具有强效阻碍排斥作用,位错不能穿过非晶相基体,可以极大地提高镀层的硬度和弹性模量,展现出和传统镀层完全不同的优异性能。Wang等^[82]通过多弧离子镀技术制备了含有非晶碳、纳米石墨和C60等多种碳微观结构的一系列纳米复合结构镀膜,硬度值范围为 $(1.833 \pm 0.355) \times 10^4$ MPa至 $(3.388 \pm 0.226) \times 10^4$ MPa,与 $\Phi 3$ mm的316不锈钢球

在新鲜5 W-30油中的摩擦系数约为0.13,在劣化油中,最高摩擦系数为0.20,最低为0.11,显示出超耐磨性。Kim等^[83]制备了纳米复合微结构的Ti合金镀层,由以Ti为主要成分的非晶基质和分散在基质中TiN纳米晶体组成,与基材的附着力高、摩擦阻力低、硬度和弹性模量特性优异。Liu等^[84]使用电弧离子镀技术在304不锈钢上沉积了具有不同N₂分压的抗菌TiN/Cu纳米复合镀层,结果表明镀层均具有很强的抗菌能力且无细胞毒性,硬度和耐磨性随晶粒尺寸的增加而提高。李茂等^[85]探讨了N₂流量和靶基距对多弧离子镀沉积AlSiN纳米复合镀层微观组织及耐腐蚀性能的影响,结果表明镀层在较远的靶基距和高氮气流量下倾向于柱状晶生长模式,结晶度较高,在近距离及低氮气流量下则会获得晶粒细小或接近非晶的致密结构,而结晶方式影响着腐蚀介质的渗透与表面氧化膜的形成,在0.15 L/min的氮气流量,180 mm的靶基距下制备的AlSiN涂层拥有最佳的抗腐蚀性能,腐蚀电流密度相比于TC4钛合金基材降低了一个数量级以上。



(a) 纳米多层结构镀层^[86]



(b) 纳米复合结构镀层^[81]

图5 纳米镀层的不同结构

Fig.5 Various structures of the nano films

4 结论

经过一定的发展,真空电弧离子镀技术取得了巨大的进步,应用领域不断扩大。但伴随着我国从制造业大国向制造业强国转型,半导体加工、机器人、航空航天装备、先进轨道交通设施、新能源汽车、核电、光伏发电等行业快速发展,涉及到大量特殊性能要求、更高质量保证或成本造价更低的先进膜层,因此真空电弧离子镀等表面技术必须根据需求向性能更好、工艺更易、适应更强、应用更广方向发展。同时,无论是新技术的研发,还是镀层的商业化推广应用,国内与国外研究机构或镀层公司相比仍存在差距。尤其是稳定可靠复合沉积设备研发,功能梯度多层镀层、纳米镀层界面生长机制、界面结构与性能的相关性和制备工艺参数的积累等诸多问题需要关注与解决。

参考文献

- [1] ANURAG R, WANG S X, KYIAKOS K. A review of plasma-assisted deposition methods for amorphous carbon thin and ultrathin films with a focus on the cathodic vacuum arc technique[J]. *Journal of Materials Research*, 2023, 38(3): 586-616.
- [2] 王福贞, 武俊伟. 现代离子镀膜技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 114.
- [3] MIN B, KIM T, CHOI S. Estimate of the cathodic arc spot size in a nontransferred arc plasma torch by comparing the results of a numerical analysis with the experimental results[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2019, 74(8): 785-790.
- [4] 孙慧贤, 卢旭东, 迟百城, 等. 电弧离子镀铬涂层对钢 1 000 ℃氧化行为的影响[J]. *电镀与精饰*, 2025, 47(4): 96-100, 112.
- [5] 陈宝清, 陈大民, 董闯. 真空离子镀代替电镀功能膜研发历史及工艺研究[C]//中国表面工程协会转化膜专业委员会. 第十届全国转化膜及表面精饰学术年会论文集. 大连: 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连远东真空技术有限公司, 2014: 93-101.
- [6] HAE W Y, YURI C, KUK H Y, et al. Chromium coatings applied to Zr alloy claddings by cathodic arc ion plating: effect of nitrogen inclusion on limiting columnar defects[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(20): 2400804-2400811.
- [7] ZHANG S, HUANG T, LIN L, et al. Spherical particle formation in arc ion plated TiSiN films from formation of droplets to core-shell structures[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2025, 504(5): 132059-132069.
- [8] BOXMAN R L, GOLDSMITH S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1992, 52(1): 39-50.
- [9] 郭朝乾, 林松盛, 石倩, 等. 基体负偏压及占空比对电弧离子镀 CrN 薄膜表面大颗粒和厚度的影响[J]. *电镀与涂饰*, 2019, 38(13): 668-673.
- [10] 曹时义, 代伟, 王俊锋. 脉冲技术在离子镀膜中的应用机理和展望[J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(4): 244-255.
- [11] RAMM J, GSTOEHL O, WIDRIG B, et al. Method for operating a pulsed arc source: US, 2005010 2337[P]. 2018-06-12.
- [12] MA Y, GONG C, TIAN X, et al. Imaging and motion of cathode group spots during pulse enhanced vacuum arc evaporation [J]. *Vacuum*, 2017, 139: 37-43.
- [13] 聂军伟, 陈庆川, 祝土富, 等. 一种等离子体射流触发脉冲阴极弧源: CN, 202211667228. 7 [P]. 2024-06-25.
- [14] FORLOVA V P, NIKOLAEV A G, OKS E M, et al. Pulsed vacuum arc plasma source of supersonic metal ion flow[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(20): 23302-23306.
- [15] 赵栋才, 马占吉, 刘兴光, 等. 多级触发脉冲电弧源技术制备掺氮 Ta-C 薄膜的力学性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(24): 108-117.
- [16] 赵栋才, 郑军, 张林, 等. 一种多级触发脉冲电弧源装置: CN, 202210602274.2[P]. 2024-02-02.
- [17] 步天龙, 贾杰, 李迪, 等. 脉冲电弧离子镀工艺参数对氧化锌压电涂层结构与电阻的影响[J]. *材料保护*, 2024, 57(5): 158-164.
- [18] 张泽, 张远涛, 张林, 等. 电弧离子镀涂层大颗粒缺陷控制与抑制技术研究进展[J]. *表面技术*, 2025, 54(1): 1-16.
- [19] XIAO B J, CHEN Y, DAI W, et al. Micro structure, mechanical properties and cutting performance of AlTiN coatings prepared via arc ion plating using the arc splitting technique[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 311: 98-103.
- [20] ZHANG K, LANG W C, DU H, et al. Study on microspot splitting characteristics in cathode spot motion of vacuum

- arc[J]. Vacuum, 2023, 213: 112151-112163.
- [21] LANG W C, ZHANG K, DU H, et al. Study on the microspot splitting characteristics of pulsed cathodic vacuum arc[J]. Vacuum, 2024, 221: 112920-112931.
- [22] 乔宏, 李灿伦, 蔺增, 等. 电弧离子镀膜运动对膜层质量影响分析[J]. 真空, 2022, 59 (5): 32-37.
- [23] VASYLIEV V, STREL'NITSKIY V E. Mechanisms affecting the speed and direction of vacuum arc cathode spots movement in a magnetic field[J]. Problems of Atomic Science and Technology, 2023, 143(1): 92-97.
- [24] LIU L M, YUAN Z, CHEN L X, et al. Experimental investigation on the velocity of cathode spots in a vacuum arc with high di/dt [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(19): 1-10.
- [25] MAHRLE A, ZIMMER O, SCHENK S, et al. A semi-empirical model of cathodic arc spot motion under the influence of external magnetic fields[J]. Plasma, 2023, 7(1): 1-15.
- [26] SONG X, WANG Q, LIN Z, et al. Control of vacuum arc source cathode spots contraction motion by changing electromagnetic field[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(2): 119-125.
- [27] ZHANG Z, MA H, LIU Z, et al. Cathode-constriction and column-constriction in high current vacuum arcs subjected to an axial magnetic field[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(14): 145203-145203.
- [28] 刘野, 刘晓华, 马槽伟. 一种离子源磁场分布结构: CN, 201510966434.1[P]. 2016-03-30.
- [29] 乔宏. 阴极电弧源磁场特性对大颗粒和靶材利用率的影响规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [30] CHO Y K, CHOI Y. Arc evaporation source having central depression magnetic field and arc ion plating apparatus and vapor deposition method of metal/metal compound using the same: KR, 20210094902[P]. 2024-05-22.
- [31] 马迎慧, 张钧. 多弧离子镀中磁场控弧技术的研究进程与展望[J]. 材料保护, 2019, 52(2): 107-112.
- [32] 潘家敬, 路海涛. 一种磁场辅助阴极电弧离子镀蒸发源: CN, 202111433226.7[P]. 2023-10-27.
- [33] 周敏, 王文宝, 朱岩, 等. 弧源磁场装置, 调节方法及电弧离子镀膜设备: CN, 20181121 0482.8[P]. 2019-01-18.
- [34] WANG S, LIN Z, QIAO H, et al. Influence of a scanning radial magnetic field on macro particle reduction of arc ion-plated films[J]. Coatings, 2018, 8(2): 49-58.
- [35] OKAZAKI N, YOSHIHARA K, ISHIZUKA H, et al. Arc evaporation source: US, 9953808B2[P]. 2018-04-24.
- [36] 郎文昌, 赵战锋, 杜昊, 等. 多模式交变耦合磁场辅助电弧离子镀膜源设计[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(8): 913-918.
- [37] 蒋钊, 肖更竭, 周辉, 等. 一种磁路可控式真空阴极电弧离子源: CN, 201911353751.0[P]. 2022-01-21.
- [38] JUN H S, EUN H B. High-efficiency arc source: KR, 20210116343[P]. 2023-03-08.
- [39] 王晓奇, 曹慧, 雷彪. 镁合金表面电弧离子镀 TiAlN 薄膜的结构与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(6): 25-29.
- [40] 杨木. 多弧离子镀磁过滤装置关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [41] 马震宇, 周潜, 李润涵, 等. 一种多弯管磁过滤真空阴极电弧离子镀装置: CN, 20231060 1588. 5[P]. 2023-09-29.
- [42] 黄杰, 史学伟, 廖斌, 等. 新型多弧磁过滤系统对 TiAlN 薄膜的组分调控[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 27-33.
- [43] KIM J K. Filtered cathodic arc source device operating system and filtered cathodic arc source operating method using the same: KR, 20210113801[P]. 2023-10-10.
- [44] 郎文昌, 刘俊红, 徐峰, 等. 一种旋转磁场导向沉积的真空镀膜设备及镀膜方法: CN, 20 2111507370.0[P]. 2022-04-12.
- [45] 赵栋才, 王启民, 郑军, 等. 一种线圈电磁挤压式磁过滤装置: CN, 202110744587.7[P]. 2022-08-02.
- [46] 杨素霞, 沈文卓. 基于智能复合镀膜设备的控制系统设计[J]. 真空, 2022, 59(1): 68-73.
- [47] 康豪. 基于 Lab Windows/Cvi 的真空镀膜设备控制系统开发[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [48] 李敬. 真空离子镀膜设备的计算机监控系统的设计与实现[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [49] SEVERIN J P, SEVERIJNS P A. In situ film thickness monitoring in CVD processes[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 137(4): 1306-1318.
- [50] MAHMUDUR M R. On-line thin film thickness monitor by pulsed laser photo acoustics [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139: 106481-106482.
- [51] DONG S T, FU X H, LI C. Noble infrared optical thickness monitoring system based on the algorithm of phase-locked output current-reflectivity coefficient[J]. Coatings, 2022,

- 12(6): 782-789.
- [52] 杜昕, 付秀华, 董所涛, 等. 变量耦合动态监控光学膜厚补偿技术[J]. 中国光学, 2025, 18(3): 467-476.
- [53] 冯森, 陈新春, 邹梁, 等. 一种脉冲电弧离子镀膜的在线检测系统及方法: CN, 20241185 6739.2[P]. 2025-04-29.
- [54] 卢国英, 石昌仑, 柳军宁. 多弧离子镀用输送系统及多弧离子镀膜工艺: CN, 202211568 853.6[P]. 2023-04-04.
- [55] 王娜, 张晓, 孙彦波, 等. 一种内表面电弧离子镀的制备方法: CN, 202310552693.4[P]. 2023-10-20.
- [56] 秦工, 张江城, 邹丽. 自动调整离子束溅射角和入射角的离子镀装置及方法: CN, 20211 0892468.6[P]. 2023-07-25.
- [57] 贾工普. 大型多弧镀膜机[C]//中国机械工程学会. 1999年第二届表面工程国际会议论文集, 1999: 216-217.
- [58] 李国军, 罗志明, 李国栋, 等. 大型离子镀装饰膜镀膜设备与技术的新进展[C]//广东省真空学会. 广东省真空学会第五届会员代表大会暨2014年学术年会论文集, 2014: 32-37.
- [59] 孙博宇, 杨鹏, 韩文莉, 等. 一种用于超长叶片多弧离子镀膜的组合工装和方法: CN, 20 2410452796.8[P]. 2024-07-12.
- [60] CHO S Y. Large-scale arc ion plating system: KR, 20240019409[P]. 2025-02-05.
- [61] VETTER J, KUBOTA K, ISAKA M, et al. Characterization of advanced coating architectures deposited by an arc-HiPIMS hybrid process[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 350: 154-160.
- [62] LI Z, QI G, XU Y C, et al. Preparation, microstructure and properties of FeCrAlTiSi high entropy alloy coatings using the combined technique of magnetron sputtering with multiarc ion plating[J]. Vacuum, 2025, 236: 114161-114172.
- [63] HAE J S, DOH K L, HAN K K. Multicoated flexible indium tin oxide electrodes fabricated using magnetron sputtering and arc plasma ion plating for flexible perovskite solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(36): 1-10.
- [64] 武晨阳, 郭巧琴, 杨忠, 等. 火炮身管材料表面 TiAlYN 镀层组织及摩擦行为研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 21-30.
- [65] 张权, 耿东森, 许雨翔, 等. 电弧/溅射复合沉积技术的发展及其在刀具涂层中的应用[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 20-35, 101.
- [66] XIE H Q, YU C T, CAI J, et al. Effect of the high-current pulsed electron beam irradiation on microstructure evolution and high temperature performance of arc ion plated Ni-20Co-28Cr-10Al- 0.5Y coating at 1373 K[J]. Surfaces and Interfaces, 2025, 62: 106149-106161.
- [67] 刘耿明, 宋国庆, 薛康辉, 等. Mo 层对钎合金表面微熔 NiCr 涂层的抗高温氧化机理的影响[J]. 材料保护, 2024, 57(10): 11-18.
- [68] RAMÍREZ-REYNA F O, RODRÍGUEZ-CASTRO G A, Figueroa-López U, et al. Effect of nitriding pretreatment on adhesion and tribological properties of AlCrN coating[J]. Materials Letters, 2021, 284: 128931-128934.
- [69] 祝绳健. 硬质合金表面纳米化基体/TiAlN 膜层组织结构及其性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [70] 张东波, 林松盛, 蔡伟通, 等. Cr-CrN-Cr-CrAlN 多层膜对 TC4 钛合金力学性能的影响[J]. 材料保护, 2024, 57(7): 14-22.
- [71] 陆昆, 赵立军. NbN 基陶瓷硬质薄膜研究现状与进展[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(9): 55-63.
- [72] MUSA M, MOUSA J, TAHERE E S, et al. Effect of layered architectural design on the tribological behaviour of AlTiN/AlTiCrN based cathodic arc evaporated physical vapour deposition coatings [J]. Metallurgical & Materials Transactions. Part A, 2025, 56(7): 2513-2536.
- [73] 杨通晗, 朱晖朝, 李福球, 等. 周期数对 Ti/TiN/Zr/ZrN 多层膜耐摩擦和耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(3): 103-111.
- [74] WANG D, LIN S S, GONG Y H, et al. Solid particle erosion resistance of Cr-base gradient multilayer coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 402: 126352-126360.
- [75] 林嵩. 梯度纳米 TiSiCN 涂层的强韧化行为与磨损腐蚀机理研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [76] 孙日, 王铁钢, 李伟, 等. Pt 改性梯度 NiCrAlY 涂层的热腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2024, 57(3): 28-37, 49.
- [77] SAINI H, KHATRI S M. A topical review on electrodeposited metal matrix nanocomposite coatings [J]. Journal of Electronic Materials, 2025, 54(8): 1-27.
- [78] CHENG Y J, HAMILTON A, ODLYZKO M, et al. Thick graded interfaces increase wear resistance in Ti/TiN nanolayered thin films[J]. Thin Solid Films, 2025, 816: 140653-140661.