

电子束气相沉积的研究进展

赖 奇 李俊翰 吴恩辉 崔 晏 李 亮 廖先杰

(攀枝花学院钒钛学院,四川 攀枝花 617000)

摘 要: 介绍了电子束真空气相沉积(EBPVD)镀膜技术的优点、国内外发展现状,并对其关键技术:材料的高速电子束蒸发过程在真空和工艺参数控制下的物质的沉积、成分和组织结构的控制等方面进行了分析。简要论述了其硬件条件,以便为钢钛复合材料的制备提供解决思路。

关键词: 电子束气相沉积;镀膜;真空

中图分类号:TB33 ,TG174.44

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2020)04-0076-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research Progress of Electron Beam Vapor Deposition

Lai Qi ,Li Junhan ,Wu Enhui ,Cui Yan ,Li Liang ,Liao Xianjie

(College of Vanadium and Titanium ,Panzhihua University ,Panzhihua 617000 ,Sichuan ,China)

Abstract: This paper introduces the control of deposition ,composition and structure of materials in the process of high-speed electron beam evaporation under the control of vacuum and technological parameters. The hardware conditions are briefly discussed in order to provide an understanding way for the preparation of steel titanium composites.

Key words: electron beam vapor deposition ,vacuum ,coating

0 引言

近年来薄膜材料有很大发展,在工业上的应用极为广泛,尤其是在电子材料与元器件工业领域中占有极其重要的地位。从晶体结构来说,薄膜材料与结构材料依然相同,既可以是单晶态,也可以是多晶态或非晶态。从元素角度分析,既可以是单质元素或化合物,也可以是无机材料或有机材料。材料镀膜方法有很多种,如电化学、电镀、离子镀、溶胶凝胶法等。在这些方法中,大多存在环境污染、效率低、产能低、膜质量差等缺点。因此,环境友好、薄膜质量高的物理气相沉积(PVD)制膜方法成为镀膜主

流方法之一。PVD 技术中,多弧离子镀和磁控溅射离子镀是工业生产的主流镀膜技术。电弧离子镀以其离子率高、薄膜生长速度快、涂层附着强度好等一系列优点,占了涂层市场的很大份额。20 世纪 90 年代中期我国从国外引进的七台大型镀膜机均为电弧离子镀,对我国的镀膜工业进步起到很大的推动作用。磁控溅射离子镀在制备多元素复合膜、超晶格薄膜和纳米晶超硬薄膜方面,超过了电弧离子镀方法,成为材料科学与工程中十分活跃的领域。然而,多弧离子镀和磁控溅射离子镀仍存在质量控制不好和效率不高的问题。

电子束真空气相沉积(EBPVD)镀膜技术克服

收稿日期:2020-03-24

基金项目:四川省科技厅项目(2018FZ0090);攀枝花市科技计划项目(2018CY-G-6);攀枝花市科技计划项目(2017CY-G-12)。

作者简介:赖 奇(1976—),男,四川攀枝花人,博士,教授,硕士生导师。研究方向为材料物理与化学,E-mail: pzhilaiqi@

163.com。

了以上缺点,在德国、日本、美国、俄罗斯、法国等西方发达工业国家广泛应用。电子束气相沉积由于具有能量密度极高、热效率高、精密易控等特点,在环境保护和材料科学等领域受到了越来越广泛的关注。作为制备与加工难熔金属的核心技术之一,电子束气相沉积已在高温合金薄膜材料的制造与加工、表面改性以及涂层制备等领域得到了广泛应用,并不断涉足航空航天、国防军工以及核工业等各个领域^[1],尤其在绝热、防腐、耐磨等方面发展迅速。而这些功能材料的发展,又很大程度上与电子束真空气相沉积制备复合薄膜材料的优势密切相关。笔者对该技术的研究进展进行了归纳分析,以期对钢钛复合材料的制备等提供解决思路。

1 工艺特点

EBPVD 是集成了计算机、控制、高能束和新材料等技术而发展起来的先进表面处理技术。作为一种新型的表面处理技术,EBPVD 的基本原理主要是利用电子束高能的特点,通过气相沉积的方法,在基材表面形成一层或多层致密的功能材料。其蒸发和随后的冷凝的物理过程形成了一个独特的过程系统,通过将原子或分子可控制排列成指定的固体结构,在开发固体结构方面提供了几乎无限可能。它具有连续化、大面积、高速率、成膜性能好、可镀物质多样性等技术优势,对于实现金属材料的高值化具有重要意义^[2]。该技术具有以下优点:

1) 功率能量利用率高

过去电子束只能做到 10 ~ 30 kW 级的输出,而目前 600 kW 级的电子束已在工业中大规模应用,而对应激光器的一般输出功率在 1 ~ 10 kW。电子束加工的最大功率能达到激光的数十倍、数百倍,其连续热源功率密度比激光高很多,可达 10^8 W/mm^2 。同时比起激光 15% 的能量利用率,电子束的能量利用率要高很多,可达到 75%。

2) 镀膜材料多,不受镀膜材料熔点的限制

大部分金属对激光的反射率很高,熔化潜热也很高,从而导致不易熔化。而且一旦熔化形成熔池后,反射率迅速降低,使得熔池温度急剧上升,导致材料汽化。而电子束可以不受加工材料反射的影响,高能量密度的电子束可以使镀膜材料在很短的时间达到 3 000 ~ 6 000 °C,很容易加工用激光气相沉积难加工的材料,而且具有的高真空工作环境可以避免氧化,这一点对钛及钛合金的镀膜尤为可贵^[3]。

3) 镀膜工艺灵活

EBPVD 可以灵活地实现在基材上镀单面、镀双面、镀单层、镀多层、混合镀^[4]。因此,其镀膜工艺灵活多变,适应性极强。

由上可知,EBPVD 技术具有能量利用率高、功率大且功率变化范围广、易于调节、加工速度快、运行成本低、真空环境无污染和使用方便等优点。是高性能表面处理的理想制造技术,在航空航天、汽车及生物医学等领域有广阔的发展前景^[4],且应用领域还在不断拓宽。但其设备体积大、结构复杂、投资成本高。

2 研究进展

2.1 国外发展现状

20 世纪 30 年代标志着电子束蒸发及其后续应用的开始。电子束真空物理气相沉积(EBPVD)被用来生产各种光学和微电子材料的薄膜。20 世纪 60 年代初,巴顿焊接研究所开始对具有预先设定的结构和性能的材料厚膜(1 ~ 2 mm)及大块凝聚态材料进行系统地研究和开发。在真空镀膜方面,美国是最先将真空镀膜技术运用在钢带表面处理上的国家,而后西方发达国家如德国等也先后建成自己的真空镀膜生产线。自 20 世纪 80 年代以来,日本引进了德国的三条真空镀膜生产线,他们投入了大量精力用于研究特效镀膜和混合镀膜。日本神户等三家钢铁公司前后建了约 7 条小规模的生产线,但是并没有得到大规模的应用,原因是电子束枪技术发展还不够完善、成本压力也较大。20 世纪 90 年代开始,伴随着高功率电子束枪等高速蒸发技术的研发成功,欧洲的相关钢铁企业和研究所对大面积钢板的真空镀膜技术进行了大量的试验和应用研究,使得钢带连续真空镀膜技术再次受到了世界各大钢铁公司的关注,各大钢铁企业先后建立了多条中试线。这其中以蒂森克努伯钢铁公司为典型代表。由于国外技术封锁和垄断,近年来钢带连续真空镀膜新技术的报道已越来越少。有限的资料显示,目前钢带连续真空镀膜技术和装备水平处于世界领先地位的是德国,在使用引进技术和设备,开发研制不同带钢镀膜材料方面日本走在了前面。所有信息都表明日本各大钢铁公司都在积极地致力于应用真空镀膜技术开发新型的钢带镀层和复合镀层,扩展钢带品种。目前,国外已有镀膜宽度 1 250 mm,带钢最大行走速度 180 m/min,年产量达 30 万 t 的钢带连续真空镀膜生产线。表 1 列出了部分国家的钢带真空镀膜生产线情况。

表1 近年来各国建立的镀膜线概况
Table 1 Overview of coating lines established in various countries in recent years

地点	建立年份	公司	带宽/mm	镀膜技术	前处理工艺	镀膜材料
欧洲	2003		400	EB 电子束蒸发	离子刻蚀	金属、氧化物
德国	2000	蒂森克努伯	300	EB+喷射蒸发	离子刻蚀	Zn、Mg、Ti
德国	1999	FEP 研究所	300	EB+喷射蒸发	EB+离子刻蚀	金属、合金
中国	1994	广东江门	300	EB	EB	Al、Cu
韩国	1993	浦项 RIS 所	300	EB+喷射蒸发	EB	Zn、Al、Ti
意大利	1992	CSM 研究所	300	EB+热喷射发	离子刻蚀	Zn、Al
奥地利	1991	Andritz	300	EB+热喷射蒸发	离子刻蚀	Zn、Al
日本	1991	日新制钢	1 250	磁控溅射	离子刻蚀	TiN、TiAlN

2.2 国内发展现状

20 世纪 80 年代末,我国广东江门从原东德 LEW 公司引进了第一条“空到空”全连续型钢带镀膜生产线(EBA-300 型)。该镀膜线配备三把 300 kW 的电子枪实现对钢带的真空清洗、预热及两面镀膜时坩埚的加热。其主要生产技术指标为:带宽 300 mm,带厚 0.2~0.8 mm,膜厚 2~8 μm,钢带最大走速 120 m/min,年产量 1 万 t 以上,镀膜材料为铝、铜、钛、镍、锌、铬等。到目前为止,我国已基本具备了电子束钢带真空镀膜设备的自主研发能力。兰州交通大学国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心研制了一套“卷对卷、空到空”结构的镀膜中试线,设备总功率 400 kW,蒸发镀膜沉积速率 0~30 m/min,钢带走速 0~60 m/min,极限真空度(空载)可达 6.0×10^{-3} Pa,可实现年产 20 万 m² 平板太阳能集热器带材。

3 关键技术分析

电子束在真空中蒸发与其它真空蒸发法的区别在于其组成通用性、技术灵活性和成本效益,这是由 EBPVD 的蒸发速率、结构控制和性能稳定所决定的。

3.1 蒸发速率

蒸发速率是 EBPVD 的一个关键性优势。众所周知,高真空下的分子从一个开放的表面蒸发,其物质的蒸发速率可用朗缪尔关系式表示:

$$v = 4.443\ 08 \alpha P_0 (M/T)^{1/2} \quad (1)$$

式中 v 是 1 cm²/s 的蒸发速率; α 是蒸发凝聚系数。 P_0 是物质的平衡压强在某一温度下的蒸汽压,Pa; M 是分子材料的质量; T 是蒸发温度, K。

在确定的蒸发材料下,蒸发速率 v 的 α 、 P_0 和 M 均为确定值。因此影响 v 的核心因素是温度^[5]。温度的高低直接受电子枪供给的热量影响。电子束是最有效的热量来源。当一个飞行的电子与固体表面碰撞时,

其动能激发过程中的消耗主要包括 X 射线辐射、二次辐射和加热。在加速电压为 20~30 kV、束流为几安培时, X 射线辐射的能量损失激励等于总功率的 0.1%。激发能量损失(二次电子和反射电子)不多于 15%。电子的动能主要在 1~2 mm 的膜层厚度转化为热能。因此,在受电子束加热时,热源主要作用于基材本身,并提供最大完成电能和热能的转换。

根据枪体结构的不同,电子枪的类型可分为环形枪和轴向枪两大类^[6]。不同电子枪的结构如图 1 所示。环形电子枪结构简单、成本低,并能以简单的电源装置工作。枪体由环形灯丝、阳极、阴极、聚焦线圈和偏转线圈等组成。环形灯丝处于负高压,用做热电子发射源,在聚焦极的定向反射和阳极的加速作用下,使电子束会聚于坩埚蒸发源中心。而轴向电子枪原理是:灯丝阴极通电后发射电子,电子经过阳极加速。调制极位于灯丝与阳极之间,对电子束电流起调节和初聚作用。聚焦极对调制极初聚的电子流进一步聚焦以获得更细的合适束斑。由于聚焦线圈的应用,使直形电子枪可以得到 100 kW/cm² 以上的高能密度,而且易控制调节。因此,目前所用的大功率电子束应用设备多采用轴向枪。作为电子束镀膜设备的核心技术所在,电子枪功率已由过去的 5~10 kW 增加到当前的 100~800 kW。电子枪的技术代表有以乌克兰制造为代表的冷阴极气体放电电子枪和以德国制造为代表的热阴极电子枪。

3.2 成分与组织控制

与合金相似,纯金属以单个原子的形式蒸发。然而,对于大多数合金而言,液态合金上面的气相组成并不等于合金的平均成分。合金会发生分馏,这导致冷凝在基体表面的凝析层会含有最多的挥发组分。采用不同的蒸发方法,可得到厚度均匀的多组分金属材料的混合物^[7]。

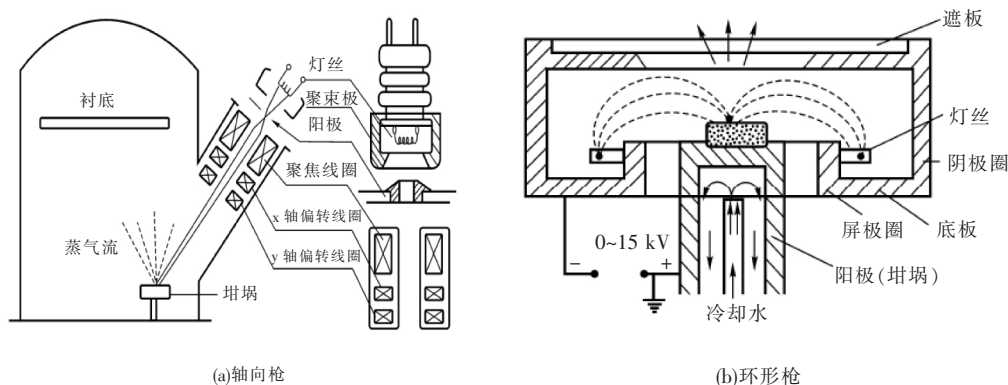


图 1 电子枪的结构原理
Fig. 1 Structure principle of electron gun

3.2.1 成分控制

化合物的蒸发(如氧化物、碳化物和硼化物等)通常伴随有初始分子种类的变化。许多难熔化合物的特征是与初始分子解离,生成气态产物。例如在蒸发过程中形成氧、铝、醛等。只有在解离产物的挥发性基本相同的情况下,才有可能从一个来源直接蒸发得到不改变化合物初始组成的蒸发冷凝产品。难熔氧化物如(Al_2O_3 、 Y_2O_3 、 ZrO_2 和 MgO)、碳化物

(如 TiC 、 ZrC 和 NbC) 以及硼化物(如 TiB_2 和 ZrB_2) 就可以从水冷铜坩埚中蒸发出来,使用电子束加热而几乎不改变成分。而其它一些化合物如 WC 、 SiC 、 TiN 、 AlN 和 ZrN 就不能直接沉积蒸发,因为它们加热时会分解,形成具有明显不同挥发性的产品。这样的化合物可以通过两个独立来源(即 WC 和 SiC) 或使用所谓的反应蒸发,用适当的气体放入工作腔,以获得反应冷凝物^[8],如图 2 所示。

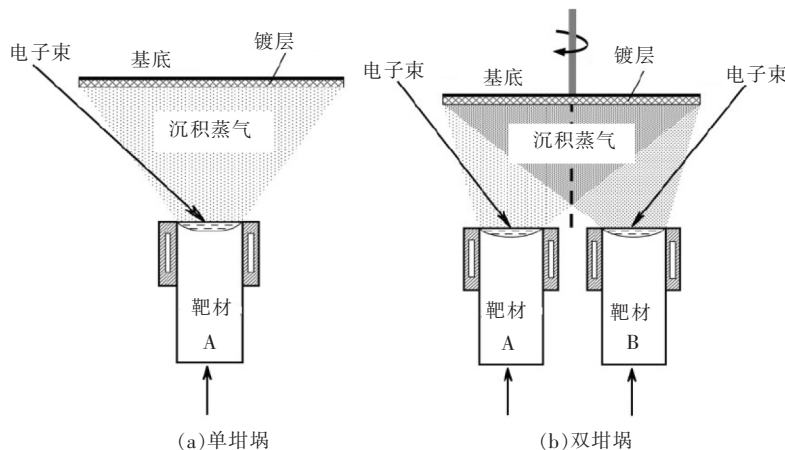


图 2 电子束镀合金膜原理
Fig. 2 Electron beam plating alloy film principle

3.2.2 组织控制

控制冷凝物对基材的粘附通过清洗、活化和冷凝表面温度,初步沉积一层薄的抗粘连层等,会产生很好的粘合在界面上,或者相反,创造了冷凝物与衬底分离的条件。可生产浓缩无机材料形成相对较薄的功能涂层产品和半成品。厚的结构涂层,作为结构承载元件以铝箔、印版和自立的形式凝结大部分

空白。

温度是决定冷凝物温度与结构的主要参数之一。原子(分子)蒸汽以一定的动能与凝结表面碰撞,进入吸附态,与表面交换能量原子,在表面上跳跃移动。表面温度决定了被吸附的原子的热激活程度,从而决定了跳跃次数,碰撞概率,与其他吸附原子相互作用以及各自原子构型的形成。

电子束蒸发纯金属和耐火材料氧化物、碳化物、硼化物类型的化合物以及随后的水蒸气凝结衬底在较宽的温度范围内 T_s , 导致形成三个有特色的构造带与极限温度 T_1 和 T_2 ^[9]。图3给出了结构分区的示意, 具体取决于相应的温度 T_s/T_m 。其中, T_m 为熔化温度(K)。通过对上述区域热激活过程活化能的评价, 揭示了各热激活过程中控制结构形成的主要机制。原子在第一区域的凝结面上从相邻的平衡位置向另一平衡位置的有限跃迁, 第二区域的扩散和第三区域的整体扩散。因此, 在低温区, 冷凝物具有无定形或纳米级结构。在第二区域, 冷凝物的特征是柱状结构, 具有明显的晶体取向。在温度范围内, 从一微米的分数到几微米, 柱状晶体的宽度随温度的升高而增大^[10]。因此, 在低温区($T_s < T_1$), 冷凝物具有无定形或纳米级结构。在第二区域($T_1 - T_2$), 冷凝物的特征是柱状结构, 具有明显的晶体取向。柱状结晶的宽度随着温度的升高而增大。 $T_1 - T_2$ 的范围从几微米到几个微米。在第三个高温区($T_s > T_2$) 柱状结构逐渐转变为等轴晶粒结构, 且晶粒尺寸随温度的升高而增大^[11-13]。

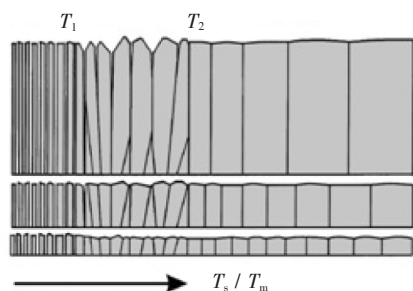


图3 结构分区示意

Fig.3 Structure partition diagram

3.3 硬件条件

EBPVD是蒸发冷凝过程。在过程易受偶然因素影响, 难免形成融合不良、隔冷等缺陷, 所以对硬件要求较高。目前, EBPVD中硬件控制技术主要包括电源和电子束扫描控制系统。

大功率电子枪高压开关电源决定了镀膜的稳定性和连续性。大功率高压开关电源的研制成功实现了高压电源领域内质的飞跃, 使电子枪电源实现了体积小、效率高。其保护响应速度及关断恢复时间达到微秒量级并可根据电子枪使用状态调整恢复时间, 其保护恢复基本满足所有类型电

子枪的应用需要。热阴极电子枪的电源系统由主高压电源、副高压电源、灯丝电源三部分组成。正常运行时, 主高压、副高压、灯丝、束流均为闭环稳定工作状态。当负载打火时, 主高压、副高压均可自行软恢复, 软恢复时间可调整。系统具有完善的过电压、过电流、负载过冲击、打火截止等各项保护功能, 能适应熔炼炉频繁短路的运行状态, 并具备人工脉冲强制锁定按钮。系统具有主高压、副高压、灯丝电压、电流、束流等各种电参数显示, 并能由远控台进行操作^[14]。

电子束扫描控制系统是控制蒸发的均匀性及蒸发速率的关键。目前, 智能化的电子束任意图形扫描及多图形功率分配技术已经成熟应用, 结合电子枪使用效果十分明显, 通过改变蒸发图形形状及组合, 可以得到最大的蒸发量以及分布现对均匀的膜层厚度, 该技术配合电子束蒸发镀膜使用可有效的改善膜厚的均匀性。其控制系统一般要求实现: ①真空系统的所有泵、阀在满足所需真空条件时开启、关闭的全自动及手动控制。②送料、摆料、拖锭、转锭、料车、料筒、定位气缸等电机在熔炼、出料全过程的运行、定位、限位的全自动运行及手动控制。③主高压电压、电流; 副高压电压、电流; 灯丝电压电流、聚焦电流、偏转电流、扫描电流、炉室真空度、料位显示等参数的实时动态监控和动态系统控制。④电压、水流、水温、电子枪、炉室真空、高压系统的保护连锁、控制功能及整个控制系统的手动、自动控制功能^[15-16]。

4 总结与展望

EBPVD技术作为近年来得到迅速发展的一种表面处理技术, 在功能材料薄膜制备和器件方面发展很快, 尤其在绝热、防腐、耐磨等特定领域更是方面发展迅速, 而这些功能材料的发展, 又很大程度上与电子束真空气相沉积制备复合薄膜材料的优势密切相关, 如电子束功率能量利用率高、电子束镀膜材料不受镀膜材料熔点的限制以及镀膜工艺灵活。基于电子束真空气相沉积的镀膜技术在功能材料薄膜和复合薄膜材料方面发展迅速。国内外在此项技术研究水平上有一定差距, 这需要我国在该技术的研发上加快进度。国内有关单位在电子束装置及工艺方面有一定积累。但要实现高性能EBPVD在国内的广泛应用, 还需做巨大努力。

参考文献

- [1] Lin Xiu, Li Mingwei, Zhong Yesheng *et al.* Microstructure and hardness of nanocrystalline ferritic ODS alloy foil with high oxide content fabricated by EBPVD [J]. *Applied Surface Science* 2013 284(1): 679–682.
- [2] Shi Liping, He Xiaodong, Li Yao *et al.* Research and application in metal/ceramics micro-layer composite materials by EBPVD [J]. *Aerospace Materials & Technology* 2003(5): 17–20.
(史丽萍, 赫晓东, 李尧等. EBPVD 金属/陶瓷微层复合材料的研究与应用 [J]. *宇航材料工艺* 2003(5): 17–20.)
- [3] Chen Jilun, Yang Jie, Yu Haijing. The abroad application and latest development of high-energy beam additive manufacturing technology [J]. *Aerospace Manufacturing Technology* 2014(4): 1–4, 10.
(陈济轮, 杨洁, 于海静. 国外高能束增材制造技术应用现状与最新发展 [J]. *航天制造技术* 2014(4): 1–4, 10.)
- [4] Perez A, Sanchette F, Billard A *et al.* Comparison of the intrinsic properties of EBPVD Al-Ti and Al-Mg coatings [J]. *Materials Chemistry and Physics* 2011 132(1): 154–161.
- [5] Dai Yongnian, Yang Bin. Vacuum metallurgy of nonferrous materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2000.
(戴永年, 杨斌. 有色金属材料的真空冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社 2000.)
- [6] Ye Zhizhen, Lü Jianguo, Lü Bin *et al.* Physics and technology of semiconductor thin films [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press 2008.
(叶志镇, 吕建国, 吕斌等. 半导体薄膜技术与物理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社 2008.)
- [7] Ustinov A I, Fesin O V. Effect of substrate temperature on the structure of Ag-Cd condensates [J]. *Surface & Coatings Technology* 2009 204(11): 1774–1778.
- [8] Guan Chunlong, Shan Yingchun, He Xiaodong. Microstructure of as-deposited Ni-Cr-Al alloy thin sheet by EBPVD [J]. *Journal of Aeronautical Materials* 2009 29(5): 7–10.
(关春龙, 单英春, 赫晓东. 电子束物理气相沉积 Ni-Cr-Al 合金薄板微观组织研究 [J]. *航空材料学报* 2009 29(5): 7–10.)
- [9] Petrov I, Barna P B, Hultman L *et al.* Microstructural evolution during film growth [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A* 2003 21(5): 117–128.
- [10] Movchan B A. Inorganic materials and coatings produced by EBPVD [J]. *Surf. Eng.* 2006 22(1): 35–45.
- [11] Prachi Sharma, Nishant Tripathi, Navneet Gupta. Nanocrystalline silicon thin film prepared by e-beam evaporation for display application [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2017 28: 3891–3896.
- [12] Han Jiecai, Li Xiaohai, Chen Guiqing *et al.* Coarsening of γ' precipitates in a nickel-based superalloy prepared by EBPVD [J]. *Journal of Aeronautical Materials* 2006(6): 38–41.
(韩杰才, 李晓海, 陈贵清等. EBPVD 制备镍基高温合金中 γ' 相的粗化 [J]. *航空材料学报* 2006(6): 38–41.)
- [13] Li Meiheng, Zhang Chongyuan, Sun Xiaofeng *et al.* High temperature oxidation behavior of electron beam physical vapor deposition thermal barrier coatings [J]. *Acta Metallurgica Sinica* 2002(9): 989–993.
(李美姮, 张重远, 孙晓峰等. 电子束物理气相沉积热障涂层的高温氧化行为 [J]. *金属学报* 2002(9): 989–993.)
- [14] He Fei, Zhang Yong, Lü Haibing *et al.* Analysis of the causes of high-voltage discharge on EB-PVD [J]. *Vacuum* 2017 54(5): 10–14.
(何飞, 张勇, 吕海兵等. EBPVD 电子枪高压放电产生原因分析 [J]. *真空* 2017 54(5): 10–14.)
- [15] He Fei, Fu You, Lu Wei *et al.* Failure study and analysis of EBPVD vacuum plug valve [J]. *Metal Working (Metal Cutting)*, 2019(7): 82–84.
(何飞, 付有, 卢伟等. EBPVD 真空插板阀故障研究与分析 [J]. *金属加工(冷加工)* 2019(7): 82–84.)
- [16] Creus J, Berziou C, Cohendoz S *et al.* Reactivity classification in saline solution of magnetron sputtered or EBPVD pure metallic nitride and Al-based alloy coatings [J]. *Corrosion Science* 2012 57: 162–173.

编辑 杨冬梅

2020 首届中国钛业攀西论坛将于 9 月 22 日在攀枝花举行

2020 首届中国钛业攀西论坛拟于 2020 年 9 月 22 日在四川攀枝花市召开。会议由四川省钒钛钢铁产业协会、中国涂料工业协会钛白粉分会、全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会、攀枝花钒钛交易中心联合主办,是目前国内唯一涵盖钛领域最全、参与面最广、影响大、规格高、官产学研联动、协会主导的钛行业盛会。论坛以“协同融合,构建钛业生态圈”为主题,联合四川省人民政府、攀枝花市人民政府及国内钛产业重点企业,着眼全产业链,突出钛原料、钛白粉和海绵钛、钛材等特色亮点,围绕攀西国家级战略资源创新开发试验区、西部大开发、成渝双城经济圈、长江经济带、攀西经济区建设开展活动;重点研讨企业竞争力、高质量发展、市场供需、产业链安全、政策导向、管理及技术创新等行业热点难点问题,意义非凡。同期活动有“2020 全国钛白粉行业年会”和“钛矿产业高峰论坛(第四届)”。现面向行业人士征集论文。会务组联系方式如下:

四川省钒钛钢铁产业协会(联系人:张琼文 17381933351 邮箱:369579708@qq.com)

中国涂料工业协会钛白粉分会(联系人:付一江 13901225996 邮箱:13901225996@139.com)

全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会(联系人:杨桂燕 18982340895 邮箱:pxftjyjc@163.com)

攀枝花钒钛交易中心(联系人:向方念 15281234787 邮箱:891636220@qq.com)