

# 面向不同应用场景的防滑涂层技术现状及未来发展趋势

白杨\*, 张勇, 崔显林, 张燕, 陈肖寒, 赵帅男, 王同良

海洋化工研究院有限公司, 高端装备涂料全国重点实验室, 青岛 266071

**摘要:** [目的] 防滑涂层具备一定的耐磨性、防滑性、抗冲击性及耐海水大气腐蚀能力。随着船舶、航空航天等领域应用装备的升级换代, 对防滑涂层的性能提出了更高的要求: 环保、轻量化、耐高温、长寿命等特殊服役性能。[方法] 介绍了防滑涂层的定义、防滑涂层作用机理及其应用特点。[结果] 总结了海洋、航空、陆地不同应用防滑涂层的性能指标要求, 重点阐述了树脂基防滑涂层材料和金属基防滑涂层材料及其应用技术取得的最新研究进展。[结论] 对防滑涂层技术面临的挑战和未来发展方向进行了总结和思考。

**关键词:** 防滑涂层; 船舶; 飞机; 应用; 综述

**中图分类号:** TQ630

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2026)04-0108-09

## Current status and future development trends of non-skid coating technology for different application scenarios

BAI Yang\*, ZHANG Yong, CUI Xianlin, ZHANG Yan, CHEN Xiaohan, ZHAO Shuainan, WANG Tongliang

Marine Chemical Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Coatings for Advanced Equipment, Qingdao 266071, China

**Abstract:** [Objective] The non-skid coating has certain wear resistance, non-skid properties, impact resistance and corrosion resistance in seawater atmosphere. With the upgrading of application equipment in shipbuilding, aerospace and other fields, higher requirements have been placed on the performance of non-skid coatings, such as high durability, resistance to high-speed airflow erosion, high temperature resistance and other special service performances. [Method] The definition of non-skid coating, the skid-resistant mechanism and the application characteristics were introduced. [Result] The performance requirements of non-skid coatings in different application scenarios, such as ocean, aviation, and land, were summarized. The development status and the application of the latest research progress of non-skid coating in different application scenarios were reviewed and analyzed in detail. [Conclusion] The challenges and the future development directions of non-skid coating were pointed out.

**Keywords:** non-skid coating; ship; aircraft; application; review

防滑涂层是指应用于材料表面以提高其表面摩擦力的一种多功能、高性能的新型材料<sup>[1]</sup>。防滑涂层具有不同的纹理结构、配套涂层体系, 例如: 海洋用防滑涂层主要应用在船舶甲板、海上钻井平台、水上栈桥、码头等地方, 形成摩擦因数较高的涂层, 追求的目标为具有尽可能稳定的摩擦因数, 理想状况是在各种使用条件和各种介质存在下仍能保持高摩擦因数<sup>[2]</sup>。特别是在有水有油的表面, 也能起到很好的防滑作用。相比于防滑橡胶板、金属压花、防滑贴、焊接防滑条等防滑方式, 防滑涂层具有质轻、耐腐蚀、防护性能好、色彩丰富、易修补、应用灵活、不受场地限制等优点<sup>[3]</sup>, 且防滑涂层的施工工艺简便、稳定可靠, 高性能的防滑涂层能做到持久防滑、耐磨长寿、耐蚀防锈、抗冲击和耐碾压, 已广泛应用于船舶甲板、舱室地板、机车通道、斜台、坡道、高速公路、台阶等有防滑需求的表面, 起到增加表面粗糙度, 增大摩擦因数, 帮助减速、停稳、防滑移、防跌倒、踩踏舒适等作用。

随着海洋强国和航天强国战略的实施, 船舶、海洋平台、航空航天等领域应用装备陆续升级换代, 对防滑涂层的性能提出了更高的要求<sup>[4-5]</sup>, 不仅要求其具有防滑、耐磨损等常规性能, 还需要具备高耐久性、耐高速气流冲刷性、耐高温性等特殊服役性能。本文分析了海洋、航空、陆地等应用场景下防滑涂层材料及其应用技术取得的最新研究进展, 介绍了不同应用领域防滑涂层的性能技术指标及标准规范, 并指出防滑涂层技术存在的问题及其未来发展趋势。

**收稿日期:** 2025-06-23 **修回日期:** 2025-09-30

**基金项目:** 深圳市科技重大专项(重 202311N150)——海洋装备环保轻量化自修复长效防腐涂层体系关键技术研发(KJZD20230923114819041)。

**通信作者:** 白杨(1990-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为重大装备用功能涂层材料。

**引用格式:** 白杨, 张勇, 崔显林, 等. 面向不同应用场景的防滑涂层技术现状及未来发展趋势[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 108-116.

BAI Y, ZHANG Y, CUI X L, et al. Current status and future development trends of non-skid coating technology for different application scenarios [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 108-116.

# 1 防滑涂层作用机理

防滑涂层的防滑性能主要由固化形成的表面摩擦因数(COF)决定,通过提高材料表面的摩擦因数并减少磨损来达到防滑目的。摩擦因数的大小与两个物体的材质及其接触表面的粗糙度、压力等密切相关<sup>[4]</sup>。根据摩擦副相对运动的速度,主要分为静摩擦因数和动摩擦因数;根据摩擦副接触类型的不同,主要分为干态、湿态和油润滑状态下的摩擦因数。另外,不同摩擦副材料对涂层防滑性能的影响也不一样,例如:硬-硬施加载荷后咬合力比较大,软-软施加载荷后接触面积大、范德华力大,硬-软施加载荷后接触面产生犁削效应。为了提高涂层表面的摩擦因数,通常在涂层中掺入不规则形状的防滑颗粒,部分防滑颗粒将从涂层表面向外延伸,固化后形成“脊骨相间”状的纹理结构,从而赋予涂层表面特定水平的粗糙度,有效提高接触材料的防滑耐磨性能<sup>[6]</sup>。图1为典型的“三明治”结构高耐磨甲板防滑涂层结构示意图,其主要由改性环氧防锈底漆、防滑层及罩面面漆组成,防滑层表面具有“脊骨相间”的纹理结构,干态摩擦因数平均达到1.20以上,具有优异的防滑性能<sup>[2]</sup>。从图2给出的不同涂层材料的防滑纹理结构可以看出,防滑涂层有脊骨相间的纹理结构,也有颗粒感凸出的纹理结构,还有相对平滑的纹理结构。

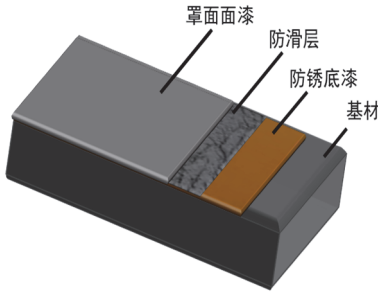


图1 高耐磨甲板防滑涂层材料结构示意图  
Figure 1 Schematic diagram of the structure of highly wear-resistant deck non-skid coating

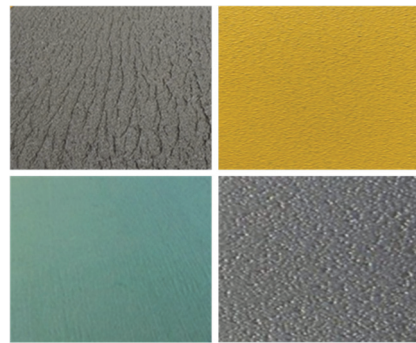


图2 不同涂层材料表面的防滑纹理结构图  
Figure 2 Non-skid textures of different coating surfaces

众所周知,材料表面相对运动产生的摩擦学过程非常复杂,涉及不同尺度和不同类型的摩擦、磨损和变形机制。如图3所示,涂层摩擦学接触机制主要包括宏观机械、材料转移、微观机械和摩擦化学<sup>[7]</sup>。所谓的宏观机械摩擦学机制不仅与整个接触面的应力和应变分布有关,还与接触导致的总塑性变形、总弹性变形、总磨损颗粒形成过程及其动力学有关。该现象发生的接触尺寸通常为 $1\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{mm}$ 之间。微观机械摩擦学机制与粗糙度表面的应力、应变,裂纹的产生、扩展,以及单颗粒形成有关。在典型的工程接触过程中,该现象发生的接触尺寸约为 $1\ \mu\text{m}$ 或更小。化学效应发生在微观或更小的尺度上,被称为摩擦化学机制。材料转移发生在微观和宏观层面,两者都影响摩擦和磨损行为。因此,防滑涂层的作用机理主要包括4个阶段:由粗糙表面凹凸处的物理咬合、锉削作用、粘滞作用产生的宏观机械摩擦学过程,材料转移,微观机械摩擦学过程,以及摩擦化学。美国材料与测试学会(ASTM)提供的防滑系数安全等级<sup>[8]</sup>如下:

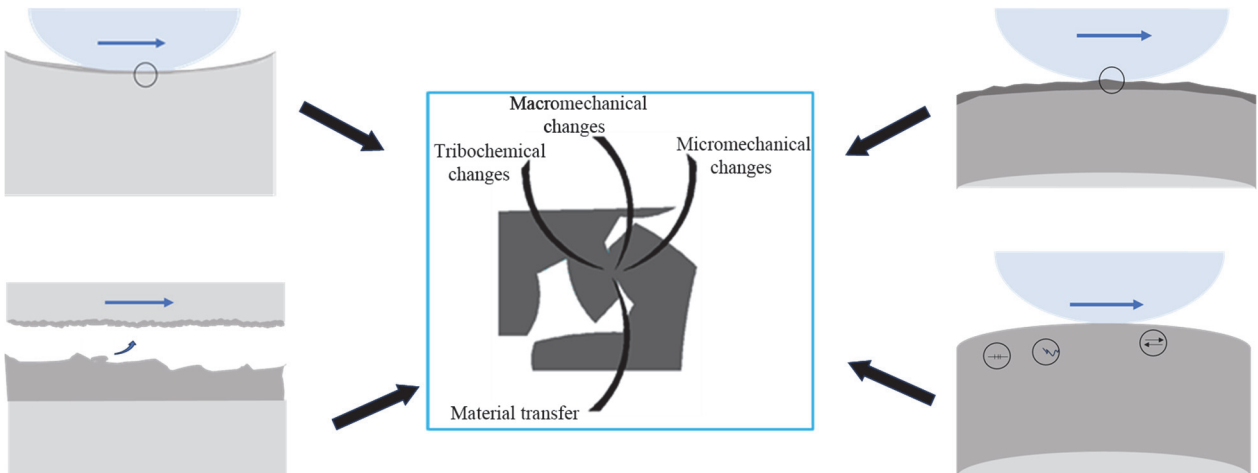


图3 相对运动的两个表面之间接触的摩擦过程包括机械和化学变化<sup>[7]</sup>  
Figure 3 Tribological process in a contact between two surfaces in relative motion including mechanical and chemical changes<sup>[7]</sup>

COF < 0.4, 非常危险; COF = 0.4 ~ 0.5, 危险; COF = 0.5 ~ 0.6, 基本安全; COF > 0.6, 非常安全。一般来说, 当涂层表面的摩擦因数超过 0.45 时, 涂层可以归类为防滑涂层。但在一些特殊应用区域, 要求防滑涂层的干态摩擦因数应在 0.7 以上, 同时保持较高的湿态、油润、耐盐雾腐蚀、耐磨损和抗冲击性能<sup>[9-11]</sup>。

## 2 防滑涂层国内外发展现状和趋势

防滑涂层种类较多, 根据应用场景的不同, 主要分为海洋用防滑涂层、航空用防滑涂层、陆地用防滑涂层等。海洋用防滑涂层具有优异的防滑性、耐海洋腐蚀性能、高耐冲击性、高耐磨性能及其他特殊的性能要求, 主要应用于海上平台甲板、机库甲板、露天甲板等区域, 基材多为低碳合金钢<sup>[12-13]</sup>。航空用防滑涂层是一种由树脂、固化剂、颜填料、防滑粒料、助剂等组成的双组分涂层体系, 主要应用于飞机内部走廊、机翼走道及各种扶手、手柄等部位, 基材主要是铝合金和复合材料<sup>[14-15]</sup>。陆地用防滑涂层近年来大量推广应用于全国各地的高速公路、隧道等设施, 防滑涂层的基材为水泥混凝土, 需要考虑底漆的渗透性及基材与防滑层之间的结合性能, 与传统的花纹钢、焊接防滑条等防滑方式相比, 防滑涂层表现出了更优异的防滑性和耐磨性<sup>[16]</sup>。

### 2.1 海洋用防滑涂层

海洋用防滑涂层主要应用于钻井平台、船舶甲板等表面。根据其使用的原材料成分不同, 主要分为树脂基防滑涂层和金属基防滑涂层<sup>[12]</sup>。长期以来, 国内外对海洋用防滑涂层的研制主要集中在树脂基防滑涂层, 这种防滑涂层的制备及施工工艺简单、施工效率高、防滑性好, 能够满足大多数海洋工程装备的防滑要求。此外, 树脂基防滑涂层还具有后期维护技术要求低、成本低等优点。然而, 树脂基防滑涂层存在耐高温性差、耐紫外老化不足等缺点。金属基防滑涂层主要用于船舶甲板, 具有抗高温老化性能优异、结合强度高、摩擦因数稳定、硬度大等优点, 但其施工效率低、耐蚀性差、后期维护保养成本高, 且施工需要专业技术人员<sup>[17]</sup>。两类涂层的应用领域、施工方式及具体的优缺点分析详见表 1。

表 1 树脂基和金属基防滑涂层的对比  
Table 1 Comparison between resin-based and metal-based non-skid coatings

涂层类型	应用领域	施工方式	优点	缺点
树脂基防滑涂层	钻井平台、机库甲板、露天甲板、露天过道	喷涂、辊涂、刷涂	施工简单、快捷, 摩擦因数高, 维护技术要求低, 成本低	耐高温性差、摩擦因数长期稳定性不足
金属基防滑涂层	船舶甲板	专用喷涂设备(电弧、超音速等离子、激光熔覆、超音速火焰、冷喷涂等)	抗高温老化性好, 结合强度高, 摩擦因数稳定, 硬度大	施工需专业人员、效率低, 耐蚀性低、维护保养成本高

#### 2.1.1 树脂基防滑涂层

树脂基防滑涂层是一种包含基料、助剂、颜填料和防滑粒料的双组分涂料, 品种繁多、用途广泛, 通用性和专用性防滑涂料也应运而生。根据成膜物质的不同, 主要分为环氧防滑涂料和聚氨酯防滑涂料。国内外对环氧防滑涂料进行了大量优化改性研究, 形成了改性环氧防滑涂料, 并实现了工程化应用。目前, 国外应用比较广泛的环氧防滑涂料产品有美国 AST 中心生产的 EPOXO 300C 环氧聚酰胺防滑涂料和 MS 系列环氧防滑涂料, 美国亚美隆公司生产的环氧硅氧烷涂料 PSX700, 以及荷兰 IP 公司生产的 Intershield 系列环氧防滑涂料<sup>[18-20]</sup>。国内关于环氧防滑涂料的研究自上世纪 70 年代起, 广泛应用于船舶甲板和海洋平台。早期防滑涂料主要采用环氧作为基料, 黄砂、水泥作为防滑耐磨材料复配制得, 但其使用寿命短, 耐冲击性和耐海洋气候差。针对环氧防滑涂料的相关缺点, 国内研究人员对其进行了优化改进<sup>[21-22]</sup>, 并在船舶甲板和海洋平台上获得了成功的应用。国内产品主要有: 浙江省水利水电科学研究院研制的 EP-1 型环氧聚酰胺涂料<sup>[2, 21]</sup>, 海洋化工研究院有限公司生产的 HF 系列型防滑涂料, 中国船舶重工集团第七二五研究所生产的 WP323 环氧甲板防滑漆, 等等。

国内外研究人员在改进环氧防滑涂料的同时, 又开发了聚氨酯防滑涂料。聚氨酯防滑涂料作为商品化产品, 国外已报道<sup>[1]</sup>的有德国 Bayer 公司生产的 Desmophen 650、Desmophen 651 与 HDI(六亚甲基二异氰酸酯)缩二脲配合制成的聚氨酯涂料, 英国学者也已将聚氨酯做成厚度达数毫米且富有弹性的防滑涂层,

其防滑耐磨性大大优于传统涂料。国内现有树脂基甲板防滑涂料具有良好的防腐性能、耐候性、耐久性和极强的附着力，同时具有施工方便、可常温固化等优势。目前我国甲板防滑涂层的技术指标<sup>[23-24]</sup>如下：耐磨性(500 g, 500 r) ≤ 100 mg，耐冲击完整率 100%，耐介质(人造海水、十二烷基苯磺酸钠溶液和柴油)浸泡 48 h，耐盐雾性(单组分漆 400 h，双组分漆 1 000 h)，耐紫外老化性(UVB-313) 300 h，耐候性(海洋大气曝晒) 12 个月，附着力(拉开法) ≥ 3 MPa，防滑性(干态摩擦因数) ≥ 0.85。

### 2.1.2 金属基防滑涂层

目前，金属基防滑涂层主要分为两大类：金属基陶瓷复合涂层和非晶合金涂层<sup>[4]</sup>。热喷涂是用于制备金属基防滑涂层的关键技术。热喷涂技术采用高温热源将金属或非金属原材料(通常以粉末、线材或溶液/悬浮液的形式存在)加热到熔融或半熔融状态，并在火焰中加速，然后快速推进到基材上<sup>[25-26]</sup>，完全或部分熔化的颗粒在撞击基材时会变形并形成碎片，如图 4 所示。该方法包括超音速火焰喷涂、等离子喷涂、电弧喷涂、火焰喷涂等多种工艺<sup>[27-32]</sup>。尽管热喷涂技术有许多优点，但其主要缺点是制备的涂层不够致密。研究发现，大量的孔隙会大大降低涂层的耐腐蚀性能<sup>[33-34]</sup>。然而，金属基防滑涂层的应用环境往往极为严苛，需要涂层兼具优异的防滑、耐磨和耐蚀性能<sup>[35-37]</sup>。另外，金属基陶瓷复合涂层面临着脆性大、抗冲击性不足等挑战，需要通过添加强韧性的材料来达到韧性和硬度的平衡<sup>[38]</sup>。研究表明，非晶合金涂层的性能取决于涂层的非晶化程度<sup>[39-41]</sup>。由于它可能导致涂层材料分布不均匀，因此涂层的工艺稳定性面临着挑战。国外以美国为首开始了新一代高性能非晶合金防滑涂层和金属基陶瓷复合防滑涂层的研究，形成了相关的产品和标准，已经开始商业化推广应用。国内现有金属基防滑涂层的性能较国际先进水平尚有差距。由于国内金属基防滑涂层的研究起步较晚，基本处于制备工艺及耐磨防护性能的实验室研究阶段，离真正的工程化现场应用还有一段距离。在研的金属基防滑涂层体系主要有 Al 基<sup>[42-44]</sup>、Fe 基<sup>[45-46]</sup>、NiCr 基<sup>[47]</sup>和 Co 基<sup>[48-50]</sup>，这些涂层体系的优缺点列于表 2。

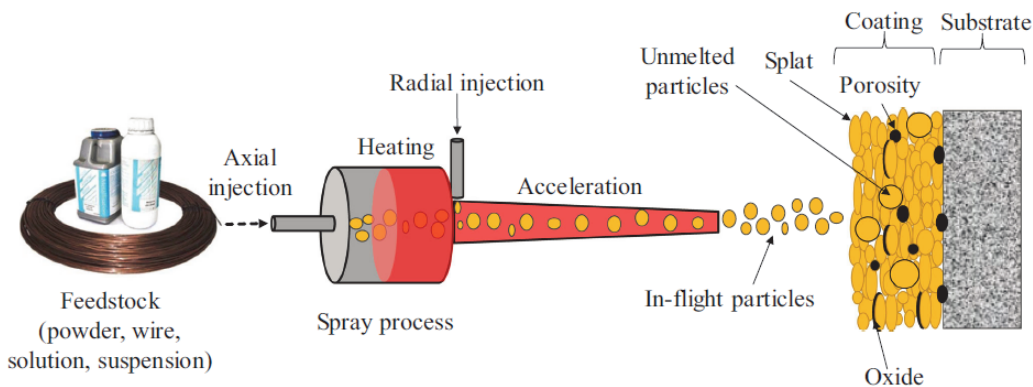


图 4 热喷涂工艺示意图：将粉末、线材、溶液或悬浮液形式的原料径向或轴向注入喷涂过程<sup>[25]</sup>

Figure 4 Schematic diagram of a thermal spray process: the feedstock material which is in forms of powder, wire, solution, or suspension can be radially or axially injected into the spray process<sup>[25]</sup>

表 2 金属基防滑涂层材料优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of metal-based non-skid coatings

涂层体系	优点	缺点
Al 基	高防滑性，优异的防腐性，喷涂成本低，施工效率高	耐磨性稍逊于 Fe 基、Co 基涂层
Fe 基	非晶形成能力强，硬度较高，抗高温磨损和耐腐蚀性能优异	制粉成本高，沉积效率低
NiCr 基	硬度高，耐高温腐蚀性能优异，抗氧化能力强	孔隙率高，硬质相易分解
Co 基	耐高温性能优异，耐磨性较好	硬质相易分解

## 2.2 航空用防滑涂层

随着我国航空技术的迅猛发展和航空装备不断更新迭代，对航空用涂层提出了更高的性能要求，特别是飞机用防滑涂层。航空用防滑涂层是目前国外使用范围仅次于蒙皮涂层及通用底漆的产品，涵盖醇酸、环氧、聚氨酯等类型，主要应用于飞机的内部走道、机翼紧急逃生通道、机翼前缘走道，货舱地板、座舱地板，以及飞机其他需要防滑的部位<sup>[14, 51]</sup>。国外航空涂料发展较早，在防滑涂层领域有着较深的研究基础和使用经验，形成了一系列的飞机用防滑涂层，有代表性的防滑涂料产品种类繁多，性能稳定，生产的公司

包括荷兰阿克苏诺贝尔(Akzo Nobel)、PPG 工业公司等。在国内,由于以前研制的多为中小型飞机,对于航空防滑涂料的使用需求不强,关于防滑涂料的研究和应用基本属于空白<sup>[52]</sup>。目前,国内对于小面积且有防滑需求的部位,通常的做法是使用防滑垫或金属印花来处理,而这两种方式都有着明显的缺点:防滑垫增重大、不美观,而金属印花施工工艺复杂、不易维护。与这两种方式相比,使用飞机防滑涂料具有明显的优点:易施工,美观,减重明显,后期维护简单。在国内,防滑涂料评价标准主要参考 A-A-59166《飞机过道用防滑涂料》(替代 MIL-W-5044)<sup>[53]</sup>、GJB 8766-2015《飞机用丙烯酸酯防滑涂料规范》<sup>[54]</sup>等。目前,我国航空用防滑涂料的技术要求<sup>[14-15, 52, 55-56]</sup>如下:

- 1) 耐磨性:在载荷 750 g、磨耗机转动 500 r 的情况下不磨穿漆膜。
- 2) 附着力:室温下在 5 cm 直径轴上弯曲 180°后无龟裂、脱落及失去附着力。
- 3) 耐高低温性: -51 °C及 93 °C下,在 5 cm 直径轴上弯曲 180°后,无龟裂、脱落及失去附着力。
- 4) 其他:不挥发物含量≥50%,铅笔硬度≥H,适用期 2~6 h。

虽然标准中规定了漆膜的耐磨性、耐高低温性等直接影响涂层使用耐久性的性能要求,但受指标范围窄的限制,只适用于某些对涂层性能要求不高的机型,对飞行环境复杂多样,甚至在极端条件下飞行,要求抗腐蚀、使用寿命长的机型不适用。

### 2.3 陆地用防滑涂层

陆地用防滑涂层通过涂层表面特殊的纹理状态,扩大底材与车辆的接触面积,形成更好的“啮合”作用。特别是在油、水状态下使表面仍能保持较高的摩擦因数,可以显著提高路面抗湿滑、防侧滑能力,同时还能起到警示的作用,保证了人员和车辆的安全。陆地用防滑涂层主要应用于坡道路面、弯道、隧道进出口、十字路口、人行横道、高速公路收费站、码头、公交车专用道等区域<sup>[57]</sup>。目前,陆地用防滑涂层主要分为 3 种类型<sup>[58]</sup>:改性环氧防滑涂层、聚氨酯防滑涂层和丙烯酸双组分防滑涂层,具体优缺点分析见表 3。双组分改性环氧树脂防滑材料附着力强、环保、摩擦因数高,不仅具有良好的耐蚀性、防滑性及耐煤油和汽油侵蚀性能,还具有弹性好、耐候性强、抗紫外线辐射、不易脆化和脱落的优点,可延长普通路面的使用寿命。聚氨酯防滑涂层的优点是耐候性优异、韧性好、塑性强,但它也存在附着力不高、重载碾压性差、使用寿命(一般 12~24 个月)比双组分改性环氧防滑涂层短等缺点。丙烯酸双组分防滑涂层具有表面干燥快、耐候性强、施工简单等优点,特别适用于严寒地区,但其与混凝土基材的附着不好,抗重载碾压能力差。因此,为防止防滑颗粒脱落,须在其表面再涂覆一层面漆。张军等<sup>[59]</sup>研制了 3 种新型涂层[即羧基苯乙烯丁二烯胶乳(CSBL)、水性环氧树脂(WER)和改性聚脲弹性体(MPE)]在飞机跑道表面的防滑和耐磨性能,发现功能性表面层可以大大提高耐磨性。砂的加入略微改善了 CSBL 和 WER 的耐磨性,而 MPE 的增强被认为是最重要的,它可以满足飞机跑道表面层的防滑和耐磨性能要求。图 5 所示为应用在高速公路路口处的防滑涂层。该涂层主要由双组分改性环氧防滑中间层和双组分聚氨酯面层配套组成,解决了传统陆地用防滑涂层摩擦因数低、易变形及重载碾压易开裂等问题。为进一步规范陆地用防滑涂料产品,我国目前已制定 GB 5768-2022《道路交通标志和标线》<sup>[60]</sup>、JT/T 280-2022《路面标线涂料》<sup>[61]</sup>、JT/T 712-2008《路面防滑涂料》<sup>[62]</sup>等规范或标准,并形成了路面防滑涂层的通用性能要求<sup>[63-66]</sup>,具体如下:

- 1) 涂层外观:干燥成型后,颜色、骨料颗粒分布应均匀,无裂纹、骨料颗粒脱落等现象。
- 2) 耐水性:在水中浸泡 24 h 应无异常现象。
- 3) 耐碱性:在氢氧化钙饱和溶液中浸泡 24 h 无异常现象。

表 3 陆地用防滑涂层材料优缺点分析  
Table 3 Advantages and disadvantages of anti-skid coating for pavement surfaces

涂层类型	优点	缺点
聚氨酯防滑涂层	耐候性(表干 3.5~5.0 h),韧性好,塑性强	附着力低,重载碾压性差,使用寿命比双组分改性环氧防滑涂层短
丙烯酸双组分防滑涂层	表干快,耐候性强,施工简单	在混凝土基材上的附着力低,抗重载碾压差
改性环氧防滑涂层	附着力强,环保,摩擦因数高,耐候性好,不易脆化和脱落	部分助剂需进口



图5 高速公路用防滑涂层  
Figure 5 Non-skid coating for highways

- 4) 低温抗裂性:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持4 h、室温放置4 h为一个循环,连续做3个循环后应无裂纹。
- 5) 抗滑性: BPN值(由摆式摩擦因数测定仪测得)45~70。
- 6) 耐候性: 经人工加速老化试验后,涂层不产生龟裂、剥落,允许轻微粉化和变色。

### 3 未来发展趋势

本研究综述了不同场景用防滑涂层的国内外研究现状,重点阐述了其作用机理、工程应用性能指标及典型部位的配套涂层体系产品。虽然防滑涂层材料可以成功满足许多应用场景的防滑耐磨要求,但是随着船舶、航空航天等大型装备不断向轻量化、环保、耐高温、高柔韧性、长寿命等技术方向的发展,对防滑涂层的性能提出了更高的要求。因此,开发环保、轻量化、长寿命涂层材料成为近年来涂料领域重点研究的课题和方向,受到越来越多研究人员的关注。同时,有机防滑涂层材料和金属基防滑涂层材料如何适应不同的基材表面是一个迫切需要解决的问题。未来的发展主要有以下几个方向:

1) 海洋用树脂基防滑涂层在船舶、海上石油钻采平台等区域虽已应用多年,但随着服役要求越来越严苛(耐高温、轻质、环保、长寿命等),开发轻量、环保、耐高温等新型防滑涂层并提高其耐久性是其未来研究发展的方向;海洋用金属基防滑涂层具备优异的耐高温性能和抗冲击性能,但涂层的施工需要专业技术人员。一方面,如何提高涂层施工效率,在不封孔的条件下具有长效耐盐雾腐蚀性能,以及与基体的适应性,都是目前亟需解决的难题;另一方面,对使用过程中破损后或达到使用周期后涂层的修复也是需要研究的问题。未来,亟需在无机防滑材料研制、喷涂技术提升,以及后期维护、修补、监测等方面展开大量研究。

2) 随着装备的不断更新迭代和需要面对更严苛的飞行环境,航空用防滑涂层在漆膜的黏度、干燥时间、耐磨性、耐介质腐蚀性、柔韧性等直接影响涂层使用寿命的性能要求方面有待进一步提高,特别是国内标准规范中规定的涂层性能指标要与国际先进水平看齐。

3) 目前国内外关于陆地用防滑涂层的产品较成熟,但关于陆地用防滑涂层的抗重载碾压性、耐久性、耐磨性、排水、降噪等路用性能方面和多功能型防滑陆地材料的研发欠缺,仍需进一步探索。

#### 参考文献:

- [1] 宋世红,张学卿. 防滑涂料概论[J]. 中国涂料, 2009, 24 (7): 60-63.  
SONG S H, ZHANG X Q. Summary on the anti-skid coatings [J]. China Coatings, 2009, 24 (7): 60-63.
- [2] 邓琦,王同良,白杨,等. 高耐磨甲板防滑涂层的制备及其性能研究[J]. 中国舰船研究, 2020, 15 (4): 82-88.  
DENG Q, WANG T L, BAI Y, et al. Preparation of highly wear-resistant non-skid deck coating and analysis of its non-skid wear resistance [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15 (4): 82-88.
- [3] 陈从棕,冷晓飞,姜秀杰,等. 轻质耐磨防滑涂料的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2022, 52 (5): 48-53.  
CHEN C Z, LENG X F, JIANG X J, et al. Preparation and performance of lightweight wear-resistant non-skid coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2022, 52 (5): 48-53.
- [4] 吴庆丹,肖金坤,张嘎,等. 热喷涂金属基防滑耐磨涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47 (4): 251-259.  
WU Q D, XIAO J K, ZHANG G, et al. Thermal sprayed metal-based non-skid wear-resistant coatings [J]. Surface Technology, 2018, 47 (4): 251-259.
- [5] 刘宇,刘春华,袁鹏园,等. 海上防滑涂层的研究及应用进展[J]. 材料保护, 2019, 52 (5): 111-115.  
LIU Y, LIU C H, YUAN P Y, et al. Progress in research and application of marine anti-skid coatings [J]. Materials Protection, 2019, 52 (5): 111-115.
- [6] CHEN W R, ZHANG J Y, QI X Y, et al. Recent progress on anti-slip and highly wear-resistant elastic coatings: an overview [J]. Coatings, 2024, 14 (1): 47.

- [7] HOLMBERG K, MATTHEWS A. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering [M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [8] Standard Test Method for Determining the Static Coefficient of Friction of Ceramic Tile and Other Like Surfaces by the Horizontal Dynamometer Pull-meter Method: ASTM C 1028-2007 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [9] ZHANG X N, LIU T, LIU C L, et al. Research on skid resistance of asphalt pavement based on three-dimensional laser-scanning technology and pressure-sensitive film [J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 49-59.
- [10] REN Z Y, HU Y L, TONG Y G, et al. Wear-resistant NbMoTaWTi high entropy alloy coating prepared by laser cladding on TC4 titanium alloy [J]. Tribology International, 2023, 182: 108366.
- [11] HADIWARDYOYO S P, SINAGA E S, FIKRI H. The influence of Buton asphalt additive on skid resistance based on penetration index and temperature [J]. Construction and Building Materials, 2013, 42: 5-10.
- [12] 邓琦, 徐金文, 高新华, 等. 舰船甲板防滑涂料技术现状及发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2013, 8 (2): 111-116.
- DENG Q, XU J W, GAO X H, et al. Technology and developing tendency of warship deck paints [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8 (2): 111-116.
- [13] 张学卿, 张卫国, 李旭朝. 防滑涂料的发展概况[J]. 现代涂料与涂装, 2002 (3): 10-12.
- ZHANG X Q, ZHANG W G, LI X Z. Development overview of the non-skid coatings [J]. Modern Paint & Finishing, 2002 (3): 10-12.
- [14] 谷美邦, 姜秀杰, 冷晓飞, 等. 飞机防滑涂料概述[J]. 中国涂料, 2013, 28 (7): 69-71.
- GU M B, JIANG X J, LENG X F, et al. Aircraft skid-resistant coatings summary [J]. China Coatings, 2013, 28 (7): 69-71.
- [15] 姜秀杰, 冷晓飞, 白杨, 等. 高耐划伤性航空耐磨涂料的研制[J]. 涂料工业, 2021, 51 (6): 69-74.
- JIANG X J, LENG X F, BAI Y, et al. Development of highly scratch resistant aviation wear resistant coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51 (6): 69-74.
- [16] 谢倩红, 罗永乐, 陈啸天, 等. 彩色路面防滑涂料的研究进展[J]. 广东化工, 2014, 41 (14): 91-92.
- XIE Q H, LUO Y L, CHEN X T, et al. Research progress of colored pavement anti-skid coating [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41 (14): 91-92.
- [17] 洪伟宏. 国外航母甲板防滑涂料技术现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2015, 37 (12): 166-169.
- HONG W H. Situation and development trend of foreign aircraft carrier deck anti-slip coating technology [J]. Ship Science and Technology, 2015, 37 (12): 166-169.
- [18] 张瑞珠, 张国钰, 魏常涛, 等. 纳米二氧化钛/玻璃鳞片协同增强环氧树脂的耐磨性研究[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43 (3): 84-91.
- ZHANG R Z, ZHANG G Y, WEI C T, et al. Study on wear resistance of epoxy resin enhanced by titania nanoparticle and glass flake [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (3): 84-91.
- [19] 孙祖信, 郭泽亮, 陈凯锋. 飞行甲板防滑涂料的研发进展[J]. 上海涂料, 2011, 49 (7): 28-30.
- SUN Z X, GUO Z L, CHEN K F. Newly research progress in the antiskid coatings for flight deck [J]. Shanghai Coatings, 2011, 49 (7): 28-30.
- [20] 白杨, 邢路阔, 李相波, 等. 海洋环境防滑涂层技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25 (6): 540-542.
- BAI Y, XING L K, LI X B, et al. Progress of non-skid coatings for seawater environments [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25 (6): 540-542.
- [21] 曾宪光, 龚敏, 刘朝辉, 等. 水性聚氨酯涂料的研究现状[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37 (22): 1060-1067.
- ZENG X G, GONG M, LIU C H, et al. Current status of research on waterborne polyurethane coatings [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37 (22): 1060-1067.
- [22] 青岛汇而通商贸有限公司. 一种具有防腐性能的涂料: 201310579963.7 [P]. 2014-03-26.
- LIU S L. A coating with anti-corrosion properties: CN103666183A [P]. 2014-03-26.
- [23] 杨哲. 飞行甲板防滑涂料性能鉴定指标分析[J]. 船海工程, 2020, 49 (5): 89-92.
- YANG Z. Performance appraisal index analysis of anti-skid coating for the flight deck [J]. Ship & Ocean Engineering, 2020, 49 (5): 89-92.
- [24] 李晓萌, 蔡绪涛, 郝希阳, 等. 航母甲板防滑涂层研究现状及发展趋势[J]. 当代化工, 2022, 51 (9): 2250-2255.
- LI X M, CAI X T, HAO X Y, et al. Research status and development trend of antiskid coating for aircraft carrier deck [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51 (9): 2250-2255.
- [25] SADEGHI E, MARKOCSAN N, JOSHI S. Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants. Part I: effect of composition and microstructure [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28 (8): 1749-1788.
- [26] DAVIS J R. Handbook of Thermal Spray Technology [M]. Geauga: ASM International, 2004.
- [27] DEFORCE B S, EDEN T J, POTTER J K. Cold spray Al-5%Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20 (6): 1352-1358.
- [28] KIILAKOSKI J, PURANEN J, HEINONEN E, et al. Characterization of powder-precursor HVOF-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ/ZrO<sub>2</sub> coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28 (1/2): 98-107.
- [29] 汪笑鹤, 胡振峰, 吕镖, 等. 镍-钴-纳米氧化铝复合电刷镀层在NaCl溶液中的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38 (9): 405-410.
- WANG X H, HU Z F, LYU B, et al. Corrosion behavior of electrobrush plated nickel-cobalt-nano-alumina composite coatings in NaCl solution [J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38 (9): 405-410.
- [30] MURRAY J W, LEVA A, JOSHI S, et al. Microstructure and wear behaviour of powder and suspension hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ coatings [J]. Ceramics International, 2018, 44 (7): 8498-8504.
- [31] BJÖRKLUND S, GOEL S, JOSHI S. Function-dependent coating architectures by hybrid powder-suspension plasma spraying: injector design, processing and concept validation [J]. Materials and Design, 2018, 142: 56-65.
- [32] SONG B, PALA Z, VOISEY K T, et al. Gas and liquid-fuelled HVOF spraying of Ni50Cr coating: microstructure and high temperature oxidation [J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 318: 224-232.
- [33] 朱无言. 封孔处理对热喷涂金属涂层耐腐蚀性能影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- ZHU W Y. Effect of sealing treatment on corrosion resistance of thermal sprayed metal base coatings [J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [34] 梁秀兵, 程江波, 冯源, 等. 铁基非晶涂层的研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45 (9): 1-12.
- LIANG X B, CHENG J B, FENG Y, et al. Research progress on Fe-based amorphous coatings [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45 (9): 1-12.
- [35] 刘宁华, 陈海新, 赖心翘, 等. AZ91D 镁合金磷酸盐转化膜封闭工艺优化[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (8): 1-5.
- LIU N H, CHEN H X, LAI X Q, et al. Optimization of sealing process conditions for phosphate conversion film on AZ91D magnesium alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (8): 1-5.
- [36] 张舒研, 高洋洋, 张志彬, 等. 高熵非晶合金耐腐蚀性能研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49 (1): 44-54.

- ZHANG S Y, GAO Y Y, ZHANG Z B, et al. Research progress in corrosion resistance of high-entropy metallic glasses [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49 (1): 44-54.
- [37] 陈永雄, 罗政刚, 梁秀兵, 等. 热喷涂技术的装备应用现状及发展前景[J]. *中国表面工程*, 2021, 34 (4): 12-18.
- CHEN Y X, LUO Z G, LIANG X B, et al. Development status and prospect on equipment application of thermal spray technology [J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34 (4): 12-18.
- [38] 张振, 周玖, 周婕, 等. 金属陶瓷层状复合材料制备工艺与失效机制研究进展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40 (6): 33-44.
- ZHANG Z, ZHOU J, ZHOU J, et al. Research progress on preparation technology and failure mechanism of metal/ceramic laminated composites [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40 (6): 33-44.
- [39] ABROSIMOVA G E. Changes in the structure of the amorphous phase under heat treatment and deformation [J]. *Journal of Surface Investigation*, 2024, 18 (1): 1-7.
- [40] 叶凤霞, 陈燕, 余鹏, 等. 通过 AC-HVAF 方法制备铁基非晶合金涂层的结构分析[J]. *物理学报*, 2014, 63 (7): 078101.
- YE F X, CHEN Y, YU P, et al. Structured analysis of iron-based amorphous alloy coating deposited by AC-HVAF spray [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63 (7): 078101.
- [41] ZHOU Y Y, MA G Z, WANG H D, et al. Microstructures and tribological properties of Fe-based amorphous metallic coatings deposited via supersonic plasma spraying [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26 (6): 1257-1267.
- [42] HUANG J, LIU Y, YUAN J H, et al. Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating deposited by flame spraying for marine applications: alumina skeleton enhances anti-corrosion and wear performances [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23 (4): 676-683.
- [43] ZHAO W X, LU Y, FU H G, et al. Developing rotary swaging process for improving the performance of wire-arc sprayed Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 484: 130840.
- [44] 李沛勇. 高性能铝基复合材料研究进展[J]. *材料工程*, 2023, 51 (4): 67-87.
- LI P Y. Research progress in high-performance aluminum matrix composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51 (4): 67-87.
- [45] YE Y Z, GUO Z J, ZHOU Z J, et al. Improved corrosion and corrosion-wear properties of Fe-based high-entropy amorphous coatings by modulating heat input of HVAF [J]. *Corrosion Science*, 2024, 232: 112049.
- [46] HUANG S L, CHEN Q J, JI L, et al. Microstructure and internal friction behavior of laser 3D printed Fe-based amorphous composites [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2024, 37 (1): 196-204.
- [47] CUI S, ZHAI H M, TONG W, et al. Corrosion and tribo-corrosion behaviors of detonation sprayed Fe-based amorphous coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 482: 130717.
- [48] CHANDRAMOULI T V, JOLADARASHI S, RAMESH M R, et al. Effect of temperature on wear and friction performance of WC-Co and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> reinforced with 17-4PH Fe-based composite coatings [J]. *Welding in the World*, 2024, 68 (1): 91-105.
- [49] SINGH H, KUMAR M, SINGH R. Slurry erosion performance of cold sprayed WC-12Co composite coatings [J]. *Surface Review and Letters*, 2024, 31 (6): 2450050.
- [50] YANG M C, JIN Q L, HUANG T H, et al. Effect of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> distribution on the wear and corrosion properties of HVOF-sprayed WC-12Co/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr composite coatings [J]. *Ceramics International*, 2024, 50 (11): 19720-19732.
- [51] 左娟娟, 姜秀杰, 白杨, 等. 飞机用环保型防滑涂层的制备及性能研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2022, 51 (2): 23-25, 165.
- ZUO J J, JIANG X J, BAI Y, et al. Study on preparation and performance of environmental friendly non-skid coatings for aircraft [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2022, 51 (2): 23-25, 165.
- [52] 张钊, 贺辉. 航空有机防滑涂料应用研究[J]. *现代涂料与涂装*, 2021, 24 (3): 5-7.
- ZHANG Z, HE H. Research on the application of organic anti-slip coating used in aviation field [J]. *Modern Paint & Finishing*, 2021, 24 (3): 5-7.
- [53] Coating Compound, Nonslip (for Walkway): CID A-A-59166A [S]. Washington: U.S. General Services Administration, 2014.
- [54] 全国塑料制品标准化中心. 飞机用丙烯酸酯防滑涂料规范: GJB 8766-2015 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2016.
- National Plastic Products Standardization Center. Specification for Acrylic Ester Antiskid Coating for Aircraft: GJB 8766-2015 [S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armament Department, 2016.
- [55] European Committee for Standardization. Aerospace Series—Paints and Varnishes—Two Component, Cold Curing Polyurethane Paint, Anti-slip: BS EN 4588-2007 [S]. London: British Standards Institution, 2007.
- [56] 吕秋生, 周如东, 陈素明, 等. 飞机涂层材料美国军用规范 MIL-PRF-85285D 浅析[J]. *上海涂料*, 2013, 51 (12): 43-47.
- LV Q S, ZHOU R D, CHEN S M, et al. A brief analysis on US military specification MIL-PRF-85285D for aircraft coating materials [J]. *Shanghai Coatings*, 2013, 51 (12): 43-47.
- [57] 邢维升, 陈从棕, 王同良, 等. 地磅用防滑涂层修复技术研究和应用[J]. *中国涂料*, 2019, 34 (5): 70-73.
- XING W S, CHEN C Z, WANG T L, et al. Research and application of weighbridge non-skid coatings repair technology [J]. *China Coatings*, 2019, 34 (5): 70-73.
- [58] 杨志. 彩色防滑路面的研究进展及现状[J]. *建材与装饰*, 2019 (32): 280-281.
- YANG Z. Research progress and current status of colored anti-skid pavement [J]. *Construction Materials & Decoration*, 2019 (32): 280-281.
- [59] ZHANG J, WENG X Z, LIU J Z, et al. Anti-slip and wear resistance performance of three novel coatings as surface course of airstrip [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 19 (4): 370-378.
- [60] 中华人民共和国交通运输部. 道路交通标志和标线: GB 5768-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Road Traffic Signs and Markings: GB 5768-2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [61] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 路面标线涂料: JT/T 280-2022 [S]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2022.
- Technical Committee for Standardization of Traffic Engineering Facilities (Highway). Pavement Marking Paint: JT/T 280-2022 [S]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2022.
- [62] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 路面防滑涂料: JT/T 712-2008[S]. 北京: 交通部公路科学研究院, 2022.
- Technical Committee for Standardization of Traffic Engineering Facilities (Highway). Pavement Antiskid Paint: JT/T 712-2008 [S]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2022.
- [63] 马中南. 路面防滑涂料的质量要求及应用技术的研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2012, 8 (2): 89-92.
- MA Z N. Research on the quality requirements and application technology of pavement anti-skid coatings [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition)*, 2012, 8 (2): 89-92.
- [64] 李博, 陈伟, 申培亮. 水泥混凝土路面防滑耐磨涂层的制备与性能研究[J]. *公路*, 2015, 60 (4): 211-219.
- LI B, CHEN W, SHEN P L. Research on the prediction and performance of wear and skid resistant coating for concrete pavement [J]. *Highway*, 2015, 60 (4): 211-219.

- [65] KIM N, JEONG H. An evaluation of skid resistance properties of asphalt concrete pavement [J]. Journal of the Society of Disaster Information, 2011, 7 (2): 87-95.
- [66] 白杨, 姜秀杰, 王同良, 等. 新型高耐磨重载碾压防滑涂层的制备

及性能表征[J]. 中国涂料, 2018, 33 (11): 38-43.

BAI Y, JIANG X J, WANG T L, et al. Development of new highly wear-resistant heavy load rolling anti-skid coatings and performance characteristics [J]. China Coatings, 2018, 33 (11): 38-43.

【编辑：温靖邦、陈丹青】