

# 冷喷涂制备防腐涂层研究现状

卢静<sup>1,2</sup>, 王光华<sup>3</sup>, 黄乐之<sup>1</sup>, 刘东华<sup>1</sup>, 闵小兵<sup>1</sup>

(1.湖南省冶金材料研究院, 长沙 410129; 2.中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;  
3.湖南坤泰冶金工程技术有限公司, 长沙 410016)

**摘要:** 针对海洋环境中各类钢铁构件日益严重的腐蚀现状, 鉴于传统热喷涂技术无法解决涂层孔隙率高、热应力大等缺陷, 冷喷涂技术制备防腐涂层受到国内外越来越多学者的关注。在分析大量文献的基础上, 对冷喷涂制备防腐涂层的研究现状进行了分类和总结。首先, 对比传统热喷涂技术特点, 指出冷喷涂技术制备金属涂层、复合涂层以及非金属防腐涂层的优势和可行性, 同时从电化学腐蚀角度揭示金属涂层和复合涂层的防腐机理, 并简述了前人对非金属涂层防腐机理的各种合理分析。其次, 从涂层孔隙率、电化学性质(包括自腐蚀电位、腐蚀电流等)以及特定应用环境下的腐蚀试验等防腐性能表征入手, 归纳了冷喷涂制备的金属涂层、非金属涂层以及复合涂层等研究成果, 并发现冷喷涂制备防腐涂层技术正在逐渐走向成熟, 相对于金属和复合涂层, 非金属涂层正在从实验室研发阶段向工业应用过渡。最后, 分析了冷喷涂制备防腐涂层当前存在的主要问题和应用前景。

**关键词:** 冷喷涂; 防腐涂层; 孔隙率; 腐蚀电位; 腐蚀电流密度

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0088-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.014

## State of the Research of Cold Spraying Anticorrosion Coatings

LU Jing<sup>1,2</sup>, WANG Guang-hua<sup>3</sup>, HUANG Le-zhi<sup>1</sup>, LIU Dong-hua<sup>1</sup>, MIN Xiao-bing<sup>1</sup>

(1.Hunan Metallurgy Material Institute, Changsha 410129, China; 2.State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China; 3.Hunan Kuntai Engineering Co., Ltd, Changsha 410016, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the increasingly serious corrosion situation of all kinds of steel components in the marine environment, the cold spraying was increasingly attracting more and more attention from researchers worldwide in view of the coating defects of traditional hot spraying technology such as high porosity, large thermal stress, etc. that couldn't be solved. This paper made detailed summarization and discussion on fabricating coatings via cold spraying according to the published literature. Firstly, the advantages and feasibilities of fabricating metallic coatings, nonmetallic coatings and composite coatings were explored in comparison with the technical characteristics of traditional thermal spraying. Meanwhile, the anticorrosion mechanism of metal coatings and composite coatings were revealed from the perspective of electrochemical corrosion, and all kinds of rational analysis of non-metallic coating anticorrosive mechanism were indicated. And then, the fabrications of metallic coatings, nonmetallic coatings and composite coatings were summarized from the coating porosity, electrochemical properties (including the cor-

收稿日期: 2016-01-27; 修订日期: 2016-05-17

Received: 2016-01-27; Revised: 2016-05-17

作者简介: 卢静(1984—), 女, 在读博士, 助理研究员, 主要研究方向为表面强化技术。

**Biography:** LU Jing (1984—), Female, Ph. D., Assistant researcher, Research focus: surface technology.

通讯作者: 闵小兵(1958—), 男, 研究员, 主要研究方向为新材料及表面工程。

**Corresponding author:** MING Xiao-bing (1958—), Male, Research fellow, Research focus: remanufacturing engineering.

rosion potential and corrosion current, etc.) and specific application environment of anticorrosion properties characterization of corrosion test and so on. The anti-corrosion coating technology of cold spraying was gradually mature. Furthermore, non-metallic coatings made the transition from laboratory research and development stage to industrial applications compared with metal and composite coatings. Eventually, the present problems and potential applications existing in anticorrosion coatings fabricated by cold spraying were discussed.

**KEY WORDS:** cold spraying; anticorrosion coating; porosity; corrosion potential; corrosion current density

海水是天然的电解质,大海中的钢铁制品如桥梁、轮船、码头、石油平台等会慢慢地发生电化学反应,给国家带来不可逆转的损失,因此高性能的金属防腐涂层一直是国内外海洋材料研究的热点。目前常用的金属防腐涂层多采用传统热喷涂技术,如电弧、爆炸、超音速火焰、等离子喷涂等。在制备金属或合金防腐涂层时,粉末颗粒或丝材在喷涂过程中的熔化或者半熔化状态,导致涂层在一定程度上发生氧化、分解、相变、晶粒长大等现象,使得涂层的使用寿命降低。因此,人们迫切希望找到一种新的喷涂工艺制备金属防腐涂层,从而解决钢铁材料或设备的长效防腐问题。

冷喷涂技术亦称为冷气体动力喷涂(Cold Gas Dynamic Spray),是近年来得到迅速发展的新型喷涂技术,它是以压缩气体(氮气、氦气、空气等)作为加速气流,带动粉末颗粒(粒径 $1\sim 50\ \mu\text{m}$ )以低温(室温至 $600\ ^\circ\text{C}$ )、超音速( $300\sim 1200\ \text{m/s}$ )和完全固态下碰撞基板,使颗粒发生强烈的塑性变形而沉积形成涂层。近些年,国内外专家学者对采用冷喷涂技术制备的各类涂层,包括金属涂层、复合涂层以及非金属涂层等进行了大量的基础研究,其中涂层防腐性能是其研究的重点之一<sup>[1-2]</sup>。针对前人对冷喷涂防腐涂层工艺参数、涂层孔隙率、组织结构、电化学性质(自腐蚀电位、腐蚀电流等)以及特定应用环境下的腐蚀试验等研究,本文分类和总结了运用冷喷涂技术制备各类防腐涂层的研究现状。

## 1 冷喷涂技术特点

由于粉末颗粒在喷涂过程中的温度低于熔点,故相对于传统热喷涂工艺,冷喷涂技术的低温特性具有如下优点:1)对基板和粉末颗粒的热影响小,可以避免喷涂粉末的氧化、烧损、相变以及组织变化等现象发生,因而冷喷涂技术在制备纳米<sup>[3]</sup>、非

晶材料<sup>[4]</sup>等热敏感材料涂层,Cu、Ti<sup>[5-7]</sup>等氧化敏感材料涂层以及碳化物复合材料等相变敏感材料方面具有明显优势,因此制备的涂层表面和内部氧化物含量少,能有效降低自然环境下的化学腐蚀速率。2)涂层间的压应力低,可以制备厚涂层,能有效解决热喷涂防腐涂层厚度薄且不均匀等问题。3)涂层致密、孔隙率低。喷涂过程中,后续粒子的冲击对初始涂层起到夯实作用,同时不存在热喷涂过程中的体积收缩,能保证很低的孔隙率<sup>[1]</sup>。例如,李海洋等<sup>[8]</sup>采用冷喷涂技术制备65%Zn-Al金属涂层的平均孔隙率为1.7%(体积分数,下同),明显低于文献[9]介绍的热喷涂Zn-Al涂层5%~15%的孔隙率,能有效地防止腐蚀介质渗透到涂层与基体的结合面而引起电偶腐蚀。4)基体选择范围更广。冷喷涂过程克服了基体工件的高温变形,因此在金属、塑料、陶瓷等基体上都可以形成防腐涂层<sup>[10-11]</sup>。

## 2 冷喷涂防腐涂层的防腐机理

电化学腐蚀机理表明,水溶液中,不同金属间的电位差可以产生微电池效应而导致腐蚀的发生。针对冷喷涂金属及其复合涂层,虽然冷喷涂涂层的孔隙率低于热喷涂涂层,但是涂层总有一定的孔隙,从而使涂层具有透气性和渗水性,当电解质透过涂层渗入到涂层与金属的结合面发生电化学腐蚀时,由于涂层的自腐蚀电位低于钢基体的电位,金属涂层作为牺牲阳极优先与电解质发生电化学反应,对钢基体起到阴极保护作用<sup>[12-13]</sup>。

随着研究者对冷喷涂涂层材料的不断开发,非金属防腐涂层,如聚合物涂层等得到推广应用。研究文献发现<sup>[14]</sup>,研究者对非金属涂层的防腐机理存在不同的理解,有人认为非金属防腐涂层有效地屏蔽了水和氧与钢基体表面的接触,起到完全屏蔽的作用。另一些研究表明,聚合物等涂层的防腐蚀作

用是因为涂层导电性降低而阻止了腐蚀的行为。还有研究者认为,聚合物的某些基团吸附在钢基体表面,阻止了被水或氧取代,如果聚合物对钢基体的吸附作用越强,聚合物涂层被水或氧的渗透概率就越小,可以进一步提高其防腐性能<sup>[15]</sup>。

### 3 冷喷涂防腐涂层的研究现状

根据冷喷涂制备防腐涂层的研究报道,将防腐涂层分为金属涂层、复合涂层、非金属涂层。

#### 3.1 金属涂层

##### 3.1.1 Al 及 Al 合金涂层

Al 及 Al 合金涂层是金属构件腐蚀保护的常用材料。谷春燕等<sup>[16]</sup>研究表明,冷喷涂 Al 涂层比热喷涂涂层均匀致密,孔隙率低,具有较高的耐蚀性。董彩常等<sup>[17]</sup>测试铝涂层在海水中的自然腐蚀电位表明,400 h 后腐蚀电位在 $-0.785$  V(vs. SCE)左右波动,可为碳钢提供阴极保护作用;对涂层交流阻抗谱和动电位极化曲线的分析表明,铝涂层表面生成致密的腐蚀产物,阻碍海水中腐蚀介质的扩散,从而降低涂层的腐蚀速度。

李相波等<sup>[18]</sup>在 Q235 钢基体上制备了不同质量比的 Al-Zn 涂层。通过扫描电镜观察和能谱分析发现,冷喷涂各组分 Al-Zn 涂层的内部无明显缺陷,氧化率为 2%~4%,涂层截面孔隙面积很小。开路电位实验表明,1500 h 后,冷喷涂各组分 Al-Zn 涂层的电位基本稳定在 $-1.0$  V(vs. SCE),可以长效地为钢基体提供阴极保护作用。通过测定涂层在海水中的腐蚀电流发现,24 d 后各组分 Al-Zn 涂层的腐蚀电流密度稳定在  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  左右,涂层表面发生均匀缓慢腐蚀,有效地降低了涂层的腐蚀速度。

石仲川等<sup>[19]</sup>研究发现,Al-Zn 涂层平均孔隙率为 0.8%,中性盐雾实验 1000 h 后的抗腐蚀性能强于纯铝和纯锌涂层<sup>[20]</sup>,即使 Al-Zn 涂层被破损也能达到 770 h 的防腐效果。同时经过 12 个月的户外大气暴晒实验发现,Al-Zn 涂层表面无腐蚀发生,对高强钢基体起到良好的保护作用。

除了集中研究 Al 及 Al-Zn 合金涂层提供阴极保护作用以外,研究者还报道了其他 Al 合金涂层的研究,例如,李相波等<sup>[21]</sup>制备的 Al-CoNiCrAlY 高温合金涂层与钢基体的结合力良好,中性盐雾实

验 240 h 后,合金涂层表面完整,只有少许白锈,在 10 d 的测试中一直没出现红锈。10 d 海水浸泡实验发现,Al-CoNiCrAlY 合金涂层的自腐蚀电位一直稳定在 $-0.85\sim-0.9$  V(vs. SCE),低于裸钢的保护电位( $-0.78$  V),对钢基体起到阴极保护作用,可用于解决船舶内燃机和发动机材料易腐蚀问题。Al 基块体非晶涂层以其优异的耐磨损和耐腐蚀性能受到广泛地研究和关注,Wu X. Q.等<sup>[22]</sup>制备的  $\text{Al}_{88}\text{Ni}_6\text{La}_6$  和  $\text{Al}_{86}\text{Ni}_6\text{La}_6\text{Cu}_2$  非晶合金涂层,与 Al 涂层相比具有更高的腐蚀电位和更低的腐蚀电流密度。D. Lahiri 等<sup>[23]</sup>通过扫描电镜发现,冷喷涂  $\text{Al}_{90.05}\text{Y}_{4.4}\text{Ni}_{4.3}\text{Co}_{0.9}\text{Sc}_{0.35}$  非晶涂层的致密度达到 98%。动电位极化试验表明, $\text{Al}_{90.05}\text{Y}_{4.4}\text{Ni}_{4.3}\text{Co}_{0.9}\text{Sc}_{0.35}$  非晶涂层在 0.01 mol 和 0.1 mol NaCl 溶液中的钝态电流为  $2.0\sim6.3 \mu\text{A}$ ,远低于 6061Al 基体的钝态电流( $9.8\sim28.7 \mu\text{A}$ ),同时利用 Tafel 线推算出的非晶涂层腐蚀速率是 6061Al 基体腐蚀速率的 1/5。因此,采用冷喷涂技术制备的 Al 基非晶涂层在防护方面具有很大的应用前景。

##### 3.1.2 Ni 和 Ni 合金涂层

Ni 及其合金在海水、低浓度氢氟酸、硫酸和碱性液体中能保持高强度和良好的耐腐蚀性能,广泛应用于耐腐蚀性的工业领域,如化学制品、石油化学加工、污染治理、石油天然气的开采、船舶工程、发电机设备,以及纸浆和纸张的生产等<sup>[24-25]</sup>。

邢路阔等<sup>[26]</sup>采用低压冷喷涂设备在 45#钢基体上制备 Ni-Zn- $\text{Al}_2\text{O}_3$  金属陶瓷涂层,工艺参数的限制导致 Ni-Zn- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层内部存在贯穿孔隙,致密性较差,但是涂层中的 Ni 有效阻止了 Zn 腐蚀产物  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  的分解而具有化学防护作用。天然海水浸泡实验表明,60 d 后, Ni-Zn- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的腐蚀表面无红锈产生,表现出良好的腐蚀防护性能。

Ni-Cr 涂层作为耐高温和耐酸碱腐蚀牺牲层,被广泛应用于锅炉、垃圾焚化炉等高温环境中。S. Harminder 等<sup>[27]</sup>采用 Kinetics 4000 高压冷喷涂系统在 Ni 基不锈钢上制备了平均孔隙率为 0.875%的 Ni-50Cr 涂层。通过在 900 °C 的废物焚烧炉中进行 1000 h 的高温腐蚀研究表明: Ni-50Cr 涂层表面生成了一层致密均匀的氧化皮,有效地阻碍了涂层与高温环境中的氧氯化反应,从而提高了超耐热不锈钢基体的使用寿命。S. Harpreet 等<sup>[28]</sup>进一步研究 Ni-20Cr 涂层在 T22 锅炉钢上的热腐蚀性。研究表

明,在温度为 900 °C 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -60wt% $\text{V}_2\text{O}_5$  熔盐环境中,制备的 Ni-20Cr、Ni-20Cr-TiC、Ni-20Cr-TiC-Re 三种冷喷涂涂层能分别降低 T22 锅炉钢 73%、83%和 90%的热腐蚀速率。

当然,并不是所有的 Ni 基合金涂层均可获得优异的防腐性能,例如, H. Koivuluoto 等<sup>[29]</sup>研究 Ni-30%Cu 涂层的自然腐蚀电位发现,与超音速火焰喷涂(HVOF)制备的涂层相比,冷喷涂 Ni-30%Cu 涂层的腐蚀几率较大,原因是 Ni-30%Cu 涂层中存在贯通的气孔。需要进一步优化冷喷涂工艺参数,才能提高 Ni-30%Cu 涂层的防腐性能。进一步对 Ni、NiCu 和 NiCu+ $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层进行涂膏耐腐蚀试验研究发现<sup>[30]</sup>,对涂层进行热处理能显著降低涂层孔隙率,提高其耐蚀性。S. Tria 等<sup>[31]</sup>采用冷喷涂技术制备 Ni-Ti 涂层时发现,在扫描电镜下,球形的 Ti 颗粒与扁平状的 Ni 颗粒交错形成多层结构,这是因为 Ni 和 Ti 颗粒本身的强度和塑性差异导致变形不一致,最终导致涂层孔隙率较大而影响其耐腐蚀性能。

### 3.1.3 Cu 基涂层

相比 Al 和 Ni 涂层,利用 Cu 金属制备 Cu 基防腐涂层的研究相对较少,但是,当代学者认为 Cu 及 Cu 合金涂层在海水中具有抗污防腐能力,例如, K. D. Efird<sup>[32]</sup>认为在海水当中的 Cu 以及 Cu 合金能够形成氧化铜膜的溶解质,从而释放出亚铜离子,能有效地毒杀海洋生物。徐经委等<sup>[33]</sup>制备的 Cu-Ni 合金涂层在经过海水曝晒 2 年后丧失了抗污防腐性能,研究发现 Cu-Ni 合金涂层中氧化亚铜成分很少,无法大量释放亚铜离子达到防止海洋生物污损船工装备的目的,进一步证实了 K. D. Efird 的研究成果。丁锐等<sup>[34]</sup>制备了防污效果最好的 Cu-30% $\text{Cu}_2\text{O}$  涂层,经过绝缘处理后,涂层的防腐防污能力大幅提升,在服役 1 年之后仍没有明显的生物附着,也没有发生严重腐蚀,目前已经成功应用于实船的海底门部位。

### 3.1.4 其他金属涂层

除了上述 Al、Ni、Cu 金属合金,研究者还采用 Ti 和其他合金作为防腐涂层,例如,王祺等<sup>[35]</sup>在不锈钢基体上制备 Ti 涂层,经过 60 d 的中性盐雾试验发现, Ti 涂层表面无红锈渗出,能有效地保护不锈钢基体。文献<sup>[36—38]</sup>通过测定 Co 基硬质合金涂层的动电位值和电流密度表明,与基板相比,动

电位为-0.3~-0.4 V、电流密度为 0.5~0.65  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  的 Co 基硬质合金涂层具有更高的腐蚀电位和更低的电流密度,能改善基板的摩擦腐蚀性能。

## 3.2 复合涂层

目前,人们对复合涂层材料的研究越来越深入。采用复合涂层技术获得的防腐涂层种类主要包括:金属-陶瓷复合涂层、陶瓷复合涂层、多层复合涂层、梯度功能复合涂层等。例如, M. Couto 等<sup>[39—40]</sup>系统地研究了冷喷涂 WC-25Co 涂层的耐蚀性能,研究表明,浸入 35 °C、5%NaCl 溶液 12 h 后,溶液尚未到达涂层/基体界面;500 h 的 5%NaCl 盐雾腐蚀后,涂层表面未出现点蚀。在优化的参数条件下,冷喷涂 WC-Co 涂层比 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层表现出更高的耐腐蚀性能。

邱善广等<sup>[41]</sup>采用冷喷涂技术制备 Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层发现,加入 10%~20% (体积分数)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的陶瓷相粉末,可以将涂层的孔隙率降低至 1%~3%。对 Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层进行海水浸泡的电化学性能测试和海洋飞溅区的耐蚀性能试验表明, Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的表面钝化膜和腐蚀产物膜具有物理隔离作用和阴极保护作用,可以为钢基体提供全面有效的腐蚀防护。K. Spencer 等<sup>[42]</sup>对 Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层进行阳极极化和盐雾腐蚀实验表明,电解液没有腐蚀基板,加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷相颗粒对涂层的抗腐蚀性没有负作用。

O. Meydanoglu 等<sup>[43]</sup>在 T6 6061Al 合金基板上分别沉积了 7075Al 合金涂层以及 7075Al- $\text{B}_4\text{C}$  和 7075Al-SiC 金属陶瓷涂层。采用微观检测手段发现,涂层孔隙率平均为(0.5±0.1)% (体积分数),不受  $\text{B}_4\text{C}$  或 SiC 陶瓷相的影响。对冷喷涂金属陶瓷涂层的开路电位和动电位极化曲线的分析表明,7075Al 合金涂层比 7075Al 金属陶瓷涂层均具有良好的耐腐蚀性。Wang Y. Y.等<sup>[44]</sup>对 5056Al-SiC 复合涂层的电化学分析同样表明,涂层中 SiC 的体积分数变化对 5056Al-SiC 复合涂层的阳极极化行为没有影响。

Li W. Y.等<sup>[45]</sup>研究 Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层在高温条件下的抗氧化腐蚀表明,涂层中的颗粒在 850 °C 高温条件下发生冶金结合而变得更加致密,整个涂层几乎没有氧化层和氧化物渗透,可以有效地防止氧化腐蚀。Zhao Z. B.等<sup>[46]</sup>利用冷喷涂技术制备 Zn-Al-Si 复合涂层时,采用电磁或激光重熔法获得 Zn 集中

分布在表层的 Zn-Al 梯度涂层, 利用涂层中电势的差异降低涂层的电化学腐蚀速率, 从而进一步提高基板的使用寿命。Zhou X 等<sup>[47]</sup>研究表明, Ti-50%HAP (羟基磷灰石) 比 Ti-Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>-20%HAP 具有更低的腐蚀电流和更高的耐腐蚀性能。

### 3.3 非金属涂层

非金属涂层具有优异的韧性、耐磨性和抗冲击性能, 因此在表面防腐、防空蚀和机械撞击等方面应用广泛<sup>[15,48]</sup>。冯拉俊等<sup>[49]</sup>采用自行研制的套管式冷喷涂枪在 X70 管线钢上沉积高密度聚乙烯涂层, 利用冲蚀和加速腐蚀试验研究聚乙烯涂层在油气管道输送环境中的耐蚀性。研究表明, 喷涂温度为 200 °C 时, 制备的聚乙烯涂层具有较好的耐冲刷性和耐腐蚀性能, 冲刷试验中只有在锐角和高压力冲刷条件下才出现划痕和减重现象, 在温度为 40~60 °C 和体积分数均为 3% 的氯化钠、硫化钠的混合溶液中, 聚乙烯涂层的腐蚀速率为 8.3~10.5 mg/(m<sup>2</sup>·h), 相当于 5 mm 厚的涂层具有长达 50 年的使用寿命。

K. Ravi 等<sup>[50]</sup>通过优化冷喷涂喷管, 在 Al 和聚丙烯基板上实现了超高分子量聚乙烯涂层的沉积, 同时通过在聚乙烯粉末中添加纳米级 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相解决了涂层稀薄和易脆问题, 为后续聚乙烯涂层的耐腐蚀性研究奠定了基础。宋岩等<sup>[51]</sup>采用冷喷涂技术在云峰电站的水口闸门上制备 IC531 无机硅酸锌涂层, 经过防腐性能对比试验表明, 相对于氯化橡胶和环氧沥青涂层, 该涂层具有更加优良的耐盐水性、耐有机溶剂性以及耐热性, 同时具有极强的粘附性、不溶解性、快速固化性和金属硬度, 是适合于大面积钢结构表面防腐的新型防腐方法。

## 4 展望

目前, 除了采用塑性较好的 Al、Zn、Cu、Ni 等金属及其合金粉末制备防腐涂层外, 采用各类非晶粉末制备非晶防腐耐磨涂层是一个非常好的发展方向, 但大部分金属及其复合防腐涂层均停留在实验室阶段, 原因是这些涂层存在一些关键问题亟待解决: 1) 制备的防腐涂层存在较差的耐磨损、耐冲击等性能; 2) 采用有限的检测手段无法说明

涂层在复杂环境下的腐蚀情况; 3) 金属粉末的制备工艺限制了涂层大范围推广。相对于金属涂层, 非金属涂层有向工业应用的趋势, 随着冷喷涂技术的不断改进, 相信未来喷涂聚乙烯、环氧树脂等高分子聚合物涂层的成功率会进一步提高。

冷喷涂防腐技术在国外诸多行业已有应用, 国内大多处在实验室阶段。但是相信随着研究的不断深入, 各种新型的冷喷涂防腐涂层会应运而生, 海工装备、公共设施、石油化工、公共设施、机械设备等众多应用范围会越来越广, 应用前景十分广阔。

### 参考文献

- [1] 周香林, 张济山, 巫湘坤, 等. 先进冷喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
ZHOU Xiang-lin, ZHANG Ji-shan, WU Xiang-kun, et al. Advanced Cold Spraying Technology and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [2] 夏光明, 周建桥, 闵小兵, 等. 涂层技术概述及工程应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(1): 53—59.  
XIA Guang-ming, ZHOU Jian-qiao, MIN Xiao-bing, et al. Overview on Coating Technology and Its Engineering Application[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2012, 40(1): 53—59.
- [3] YAO H L, YANG G J, Fan S Q. Ceramic Nano-Particle/Substrate Interface Bonding Formation Derived from Dynamic Mechanical Force at Room Temperature: HRTEM Examination[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(4): 720—728.
- [4] LIST A, GARTNER F, MORI T, et al. Cold Spraying of Amorphous Cu<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub> Alloys[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 24(1/2): 108—118.
- [5] WINNICKI M, MALACHOWSKA A, DUDZIK G, et al. Numerical and Experimental Analysis of Copper Particles Velocity in Low-pressure Cold Spraying Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 268: 230—240.
- [6] YIN S, HE P J, LIAO H L, et al. Deposition Features of Ti Coating Using Irregular Powders in Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(6): 984—990.
- [7] LUO X T, LI C X, SHANG F L, et al. WC-Co Composite Coating Deposited by Cold Spraying of a Core-Shell-Structured WC-Co Powder[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 24(1/2): 100—107.
- [8] 李海祥, 孙明先, 李相波, 等. 冷喷涂 65%Zn-Al 复合涂层的沉积特性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1353—1359.  
LI Hai-xiang, SUN Ming-xian, LI Xiang-bo, et al. Depositing Characteristic of 65%Zn-Al Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spray[J]. The Chinese Journal of Non-

- ferrous Metals, 2010, 20(7): 1353—1359.
- [9] 张中礼. 热喷涂技术在钢铁结构件防腐方面的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(6): 354—358.  
ZHANG Zhong-li. Application of Thermal Spraying Technology for Corrosion Protection[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(6): 354—358.
- [10] LEE C H, KIM J. Microstructure of Kinetic Spray Coatings: A Review[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(4): 592—610.
- [11] 石仲川, 刘德鑫, 张晓云, 等. 冷喷涂技术的研究现状及在航空工业领域内的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(9): 70—74.  
SHI Zhong-chuan, LIU De-xin, ZHANG Xiao-yun, et al. Research of Cold Gas Dynamic Spray Technology and Its Application in Aviation Industry[J]. Materials Review, 2012, 26(9): 70—74.
- [12] ZHAO Wei-min, ZHANG Ti-ming, XIN Ruo-fei, et al. Effects of Thermally Sprayed Aluminum Coating on the Corrosion Fatigue Behavior of X80 Steel in 3.5wt% NaCl [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(5): 974—983.
- [13] 黄永昌. 电化学保护技术与应用-阴极保护原理及应用[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(4): 191—193.  
HUANG Yong-chang. Electrochemical Protection Technology and Application—the Principle and Application of Cathodic Protection[J]. Corrosion and Protection, 2000, 21(4): 191—193.
- [14] 郭清泉, 陈焕钦. 金属腐蚀与涂层防护[J]. 合成材料老化与应用, 2003, 32(4): 36—39.  
GUO Qing-quan, CHEN Huan-qin. The Protective Mechanism and Evaluating Methods of Anticorrosion Coatings[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2003, 32(4): 36—39.
- [15] SITARAM S P, STOFFER J O, KEEFE T J. Application of Conducting Polymers in Corrosion Protection[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 69: 65—69.
- [16] 谷春艳, 霍树斌, 王吉孝, 等. 冷喷涂 Al 涂层性能及沉积行为的分析[J]. 焊接, 2006(12): 42—45.  
GU Chun-yan, HUO Shu-bin, WANG Ji-xiao, et al. Analysis on Depositing Behavior and Properties of Al Coatings by Cold Spraying[J]. Welding and Joining, 2006(12): 42—45.
- [17] 董彩常. 冷喷涂铝涂层表面特性表征及其腐蚀行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.  
DONG Cai-chang. Research on Surface Characteristic and Corrosion Behavior of Cold-sprayed Aluminum Coating[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [18] 李相波, 李海祥, 黄国胜, 等. 冷喷涂锌铝复合涂层防腐性能研究[J]. 材料保护, 2011, 44(4): 131—135.  
LI Xiang-bo, LI Hai-yang, HUANG Guo-sheng, et al. The Characteristic Study of Cold Spray Zinc Aluminum Composite Coating Corrosion Protection[J]. Materials Protection, 2011, 44(4): 131—135.
- [19] 石仲川, 张晓云, 陈昊, 等. 高强钢冷喷涂铝锌复合涂层性能研究[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 14—19.  
SHI Zhong-chuan, ZHANG Xiao-yun, CHEN Hao, et al. Properties of Cold Spray Al/Zn Coatings on High-strength Steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(2): 14—19.
- [20] 李海洋, 李相波, 孙明先, 等. 冷喷涂 Zn-50Al 复合涂层在海水中的耐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 62—65.  
LI Hai-yang, LI Xiang-bo, SUN Ming-xian, et al. Corrosion Resistance of Cold Sprayed Zn-50Al Coating in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 62—65.
- [21] 李相波, 黄国胜, 李海涛. 冷喷涂 Al-CoNiCrAlY 合金涂层性能研究[C]//第五届全国腐蚀大会论文集, 2009.  
LI Xiang-bo, HUANG Guo-sheng, LI Hai-tao. The Characteristic Study of Cold Spray Al-CoNiCrAlY Coating[C]// Proceedings of the Fifth National Conference on Corrosion, 2009.
- [22] WU X Q, MA M, TAN C G, et al. Comparative Study on Thermodynamical and Electrochemical Behavior of  $\text{Al}_{88}\text{Ni}_6\text{La}_6$  and  $\text{Al}_{86}\text{Ni}_6\text{La}_6\text{Cu}_2$  Amorphous Alloys[J]. Journal of Rare Earths, 2007, 25(3): 381—384.
- [23] LAHIRI D, GILL P K, SCUDINO S, et al. Cold Sprayed Aluminum Based Glassy Coating: Synthesis, Wear and Corrosion Properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232: 33—40.
- [24] MANKINS W L, LAMB S. Nickel and Nickel Alloys, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials[J]. ASM International, 1990, 2: 428—445.
- [25] SHERIF E, ALMAJID A, BAIRAMOV A, et al. Corrosion of Monel-400 in Aerated Stagnant Arabian Gulf Seawater after Different Exposure Intervals[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2011, 6: 5430—5444.
- [26] 邢路阔, 白杨, 黄国胜, 等. 低压冷喷涂镍-锌-氧化铝复合涂层在天然海水中的腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 829—832.  
XING Lu-kuo, BAI Yang, HUANG Guo-sheng, et al. Corrosion Resistance of Low Pressure-cold Sprayed Nickel-zinc-alumina Composite Coating in Natural Sea Water[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 829—832.
- [27] HARMINDER S, SIDHU T S, KALSI S B S, et al. Hot Corrosion Behavior of Cold-Sprayed Ni-50Cr Coating in an Incinerator Environment at 900 °C[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 24(3): 570—578.
- [28] HARPREET S, BALA N, KAUR N, et al. Effect of Additions of TiC and Re on High Temperature Corrosion Performance of Cold Sprayed Ni-20Cr Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 280: 50—63.
- [29] KOIVULUOTO H, LAGERBOM J, VUORISTO P. Microstructural Studies of Cold Sprayed Copper, Nickel, and Nickel-30% Copper Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(4): 488—497.
- [30] KOIVULUOTO H, BOLELLI G, MILANTI A, et al. Mi-

- crostructural Analysis of High-pressure Cold-sprayed Ni, NiCu and NiCu+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 268: 224—229.
- [31] TRIA S, ELKEDIM O, LI W Y, et al. Ball Milled Ni-Ti Powder Deposited by Cold Spraying[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2009, 483(1/2):334—336.
- [32] EFIRD K D. Inter-relation of Corrosion and Fouling for Metals in Seawater[J]. Material Performance, 1976, 8(4): 16—20.
- [33] 徐经委, 于良民, 李霞, 等. 自抛光防污涂层及评价技术的发展[J]. 涂料工业, 2011, 41(12): 62—66.  
XU Jing-wei, YU Liang-min, LI Xia, et al. Development of Self-polishing Antifouling Coating and Evaluation Approaches[J]. Paint and Coatings Industry, 2011, 41(12): 62—66.
- [34] 丁锐, 李相波, 王佳, 等. 冷喷涂 Cu-Cu<sub>2</sub>O 涂层防污性能研究[J]. 涂料工业, 2013(9): 1—6.  
DING Rui, LI Xiang-bo, WANG Jia, et al. Study on Antifouling Effect of Cold Spray Cu-Cu<sub>2</sub>O Coating[J]. Paint and Coatings Industry, 2013(9): 1—6.
- [35] 王祺. 1Cr13 不锈钢表面冷喷涂 Ti 涂层的制备及其腐蚀行为的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
WANG Qi. Preparation and Corrosion Behavior of Cold Sprayed Titanium Coating on 1Cr13 Stainless Steel Substrate[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [36] CINCA N, GUILMANY J M. Structural and Properties Characterization of Stellite Coatings Obtained by Cold Gas Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220: 90—97.
- [37] MALAYOGLU U, NEVILLE A, LOVELOCK H. Assessing the Kinetics and Mechanisms of Corrosion of Cast and HIP Stellite 6 in Aqueous Saline Environments[J]. Corrosion Science, 2005, 47(8): 1911—1931.
- [38] MALAYOGLU U, NEVILLE A. Mo and W as Alloying Elements in Co-based Alloys-their Effects on Erosion-corrosion Resistance[J]. Wear, 2005, 259(1—6): 219—229.
- [39] COUTO M, DOSTA S, TORRELL M, et al. Cold Spray Deposition of WC-17 and 12Co Cermets onto Aluminum [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235: 54—61.
- [40] COUTO M, DOSTA S, FERNANDEZ J, et al. Comparison of the Mechanical and Electrochemical Properties of WC-25Co Coatings Obtained by High Velocity Oxy-fuel and Cold Gas Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(8): 1251—1258.
- [41] 邱善广. 低压冷喷涂铝涂层的防腐性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
QIU Shan-guang. Research of Anti-corrosion of Al Coatings by Low Pressure Cold Spray Technology[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [42] SPENCER K, FABIANIC D M, ZHANG M X. The Use of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cold Spray Coatings to Improve the Surface Properties of Magnesium Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204: 336—344.
- [43] MEYDANOGLU O, JODOIN B, KAYALI E S. Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Performance of 7075 Al Matrix Ceramic Particle Reinforced Composite Coatings Produced by the Cold Gas Dynamic Spraying Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235: 108—116.
- [44] WANG Y Y, NORMAND B, MARY N, et al. Microstructure and Corrosion Behavior of Cold Sprayed SiC/Al 5056 Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 251: 264—275.
- [45] LI W Y, HUANG C J, YU M, et al. Investigation of High Temperature Oxidation Behavior and Tribological Performance on Cold Sprayed Nickel-Alumina Composite Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 239: 95—101.
- [46] ZHAO Z B, GILLISPIE B A, SMITH J R. Coating Deposition by the Kinetic Spray Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200 (16/17): 4746—4754.
- [47] ZHOU X, MOHANTY P. Electrochemical Behavior of Cold Sprayed Hydroxyapatite/Titanium Composite in Hanks' Solution[J]. Electrochimica Acta, 2012, 65: 134—140.
- [48] WANG Y Q, HUANG L P, LIU W L, et al. The Blast Erosion Behavior of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene, Wear, 1998, 218(1): 128—133.
- [49] 冯拉俊, 李光照, 史惠辉, 等. 冷喷涂聚乙烯防腐涂层的研究[J]. 焊管, 2009, 32(7): 26—29.  
FENG La-jun, LI Guang-zhao, SHI Hui-hui, et al. Research on Cold Spraying Polyethylene Coating Layer[J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32(7): 26—29.
- [50] RAVI K, ICHIKAWA Y, DEPLANCKE T, et al. Development of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Coating by Cold Spray Technique[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(6): 1015—1025.
- [51] 宋岩, 王茂林. 水电站钢结构喷涂锌防腐选择[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(4): 48—51.  
SONG Yan, WANG Mao-lin. Selection of Spraying Zinc Corrosion Protection of Steel Structure in Hydropower Station[J]. Mechanical and Electrical Technique of Hydropower Station, 2013, 36(4): 48—51.