

热喷涂 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性与孔隙率研究进展

姜超平, 刘王强

(长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064)

摘 要: 热喷涂 Fe 基非晶合金涂层的综合性能优异, 特别是在耐磨、耐腐蚀方面具有传统晶体材料无可比拟的优势, 因而广泛应用于材料表面的防护领域。然而热喷涂涂层为典型的层状结构, 涂层内部会存在一定量的孔隙, 致使涂层耐腐蚀性能下降。首先介绍了热喷涂 Fe 基非晶涂层的腐蚀机理及其影响因素, 总结了热喷涂涂层孔隙产生的机制、分类和影响因素。接着重点介绍了孔隙与热喷涂 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性之间关系的研究进展。最后, 通过对热喷涂涂层的形成过程与孔隙形成机理进行分析, 粒子铺展变形能力差是显著影响涂层形成时粒子相互嵌套叠加和变形能力的主要原因。所以, Fe 基非晶涂层可以从改变喷涂粉末成分和粒度、第二相粒子加入及喷涂工艺参数优化等措施, 来改善粒子铺展变形能力, 提高致密度。采用激光快速表面重熔技术对涂层微表层进行快速重熔处理, 同样可以达到降低涂层孔隙率、提高涂层耐腐蚀性的目的。

关键词: Fe 基非晶合金; 热喷涂; 涂层; 孔隙率; 激光重熔; 腐蚀机理

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0238-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.038

Porosity and Corrosion Resistance of Fe-based Amorphous Coatings Prepared by Thermal Spraying

JIANG Chao-ping, LIU Wang-qiang

(School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

ABSTRACT: Owing to excellent comprehensive performance, especially incomparable advantage in wear and corrosion resistance compared with traditional crystalline materials, thermal sprayed Fe-based amorphous coating is widely used for surface protection. However, as a typical lamellar structure, it has certain amount of pores inside as well, resulting in reduction of its corrosion resistance. Corrosion mechanism of Fe-based amorphous coating and factors influencing its corrosion resistance were first introduced, forming mechanism, classification and influencing factors of thermal sprayed Fe-based amorphous coating were summarized. Then research progress of relationship between pore defects and corrosion resistance of Fe-based amorphous coating was introduced in details. According to analysis of thermal sprayed coating formation process and pore formation mechanism, poor spreading and deformation capabilities of particles had significant effects on mutual embedding and deformability of particles when the coating took shape. Therefore, Fe-based amorphous coating could improve the spreading and deformation capabilities of particles and even compactness of the coating by changing composition of spraying powder, particle size, adding

收稿日期: 2016-12-16; 修订日期: 2017-02-26

Received: 2016-12-16; Revised: 2017-02-26

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2016JM5058); 中央高校基金 (310831161005)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (2016JM5058) and the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Chang'an University (310831161005)

作者简介: 姜超平 (1977—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究领域为热喷涂制备非晶、耐磨和抗腐蚀涂层。

Biography: JIANG Chao-ping (1977—), Male, Ph. D., Associate professor, Master instructor, Research focus: the amorphous, wear and corrosion-resistant coating prepared by thermal spraying.

second-phase particle and optimizing spraying process parameters. Remelting the coating microlayer rapidly by adopting laser rapid surface re-melting technology could also reduce the porosity and improve corrosion resistance of the coating.

KEY WORDS: Fe-based amorphous alloy; thermal spraying; coating; porosity; laser remelting; corrosion mechanism

腐蚀是自然界普遍存在的现象,也是金属设备材料失效的主要形式之一。材料腐蚀不仅严重影响材料的使用寿命,造成巨大的国民经济损失,而且还会引起灾难性事故,危害人身安全^[1-2]。相比于传统的晶体材料,非晶合金结构特殊,性能优异,因而被广泛用于工业生产中^[3]。其中,Fe 基非晶合金不仅具有一般非晶合金的基本性能,而且其优异的耐腐蚀性和相对低廉的成本使其成为腐蚀防护领域首选材料^[4-5]。然而,由于苛刻的制备条件和昂贵的制造成本,非晶合金的尺寸往往被限制在毫米范围之内,这极大地限制了其工业应用。热喷涂技术具有快速冷却成形的特点,满足非晶形成的基本条件。因此,采用热喷涂技术在易腐蚀金属材料表面制备 Fe 基非晶涂层,不仅能将 Fe 基非晶涂层优异的耐腐蚀性和金属材料良好的强韧性、工艺性能结合起来,拓宽了金属材料的应用范围,而且过程可控、成本低廉等特点,使得该技术在零件修复和材料表面防护领域得到了广泛的应用^[6-8]。然而,由于热喷涂涂层是由无数粒子变形、相互交错和堆积而成的层状结构,涂层中会不可避免地存在一些孔隙。孔隙的存在会严重影响涂层的综合力学性能,尤其在腐蚀性环境中,腐蚀介质会通过孔隙进入涂层,甚至到达涂层与基体的界面处产生局部腐蚀,从而导致涂层失效^[9-10]。因此,研究热喷涂 Fe 基非晶涂层的耐腐蚀性能和孔隙之间的关系,是充分发挥 Fe 基非晶涂层中非晶合金优异耐腐蚀性能的关键。

1 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性及影响因素

材料的成分和结构决定其性能,性能决定其用途。Fe 基非晶合金作为一种非晶态的均匀单相,不存在晶界、位错等晶体缺陷,因而具有极高的强度、硬度和优异的耐腐蚀性能。其耐腐蚀性远远高于同成分的晶态合金和不锈钢,甚至在某些特殊的应用中可代替镀硬铬涂层,因而被广泛用于严重的腐蚀性和磨蚀性环境中^[11]。铁基非晶合金优异的耐腐蚀性首次发现于 1974 年。据报道,Fe-Cr-P-C 非晶态合金没有显示出任何可测量的腐蚀速率,而晶态 18-8 奥氏体不锈钢的腐蚀速率在相同的条件下超过 1 cm/a^[12]。从那时起,人们开始研究非晶合金的腐蚀行为和机理。其中,Habazaki H^[13]研究发现,非晶合金的成分会影响其耐腐蚀性,其影响机理为:不同成分的非晶合金在腐蚀介质中所形成的钝化膜的稳定性和溶解速率不

同,因而其耐腐蚀性也不同。Gebert A^[14]通过元素添加设计不同成分的非晶合金探究了上述现象,结果表明,元素的添加会不同程度地影响非晶合金钝化膜的溶解速率,从而影响其耐腐蚀性,并且均一性的单相非晶合金比多相晶体具有更好的稳定性和钝化能力。基于前人的研究成果,近年来学者们通过对非晶合金腐蚀行为和机理的认识,对影响热喷涂 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的因素进行了进一步的研究。

张欢等人^[15]研究了喷涂粉末的粒径对涂层耐腐蚀性能的影响,研究发现,随着粉末粒径的增大,涂层耐腐蚀性能逐渐降低。造成这一现象的主要原因是:较大粒径的粉体制备的涂层含有较多孔隙缺陷,为腐蚀液的渗透提供了通道。Zhang C 等人^[16]同样发现粉末粒度对所得涂层微观组织和耐腐蚀性具有显著影响,粉末粒度相对较小,涂层的显微组织越致密,孔隙率越小,但相对较大粒度的粉末制备的涂层耐腐蚀性越好。这主要是因为涂层的耐腐蚀性与涂层的润湿性密切相关,涂层润湿性越好,则其耐腐蚀性越好。由于增加粉末粒度会减少涂层中的氧含量和增加涂层的润湿性,因而会提高涂层的耐腐蚀性。

Qin Y 等人^[17]通过优化喷涂参数获得了结构致密和具有优异耐腐蚀性的 Fe 基非晶涂层。通过寻求合理的喷涂距离、气流量和喷涂功率,可以降低涂层孔隙率,增加涂层中的非晶含量,进而增加涂层的耐腐蚀性。王刚^[18]通过相同的实验思路探究了影响 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的因素,结果发现,喷涂距离过大或过小都不利于非晶相的产生,并且喷涂距离的增加会严重削弱涂层的耐腐蚀性能,甚至会使涂层出现大量腐蚀坑洞和脱落现象。Zhang H^[19]发现喷涂功率对涂层耐腐蚀性具有类似的影响,即随着喷涂功率的增加,尽管涂层的非晶含量会降低,但涂层会变得更加致密,耐腐蚀性会显著增强。傅斌友等人^[20]研究了非晶/纳米晶复合涂层的耐腐蚀性能,研究发现尽管热处理过程中涂层会不同程度地发生晶化现象,但由于纳米晶的出现使涂层微观结构变致密,所以其耐腐蚀性比未处理之前有很大程度的提高。鉴于此,Xiang L I^[21]分别探究了相和结构对涂层耐腐蚀性能的影响,发现虽然晶化相的出现降低了非晶含量,然而纳米晶可以使涂层具有更致密的结构,因而涂层的耐腐蚀性强于非晶单相。

总之,影响 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的因素主要是非晶含量和孔隙率,具体的影响表现为:当涂层中

的孔隙率低于 1.21% 时, 涂层的耐腐蚀性由涂层中的非晶含量决定; 当涂层中的非晶相高于 1.21% 时, 涂层的耐腐蚀性由涂层中的孔隙率决定^[22]。通过以上的研究发现, 尽管非晶含量对涂层的耐腐蚀性起至关重要的作用, 然而微观结构 (即孔隙缺陷) 才是制约非晶涂层耐腐蚀及其广泛应用的瓶颈。因此认识热喷涂涂层孔隙产生的机制, 并研究涂层耐腐蚀性与孔隙之间的关联性, 仍然是 Fe 基非晶涂层在腐蚀防护领域的一个巨大挑战。

2 热喷涂涂层孔隙产生的机理和影响因素

2.1 孔隙产生的机理

热喷涂是借助某种热源将喷涂材料加热至熔融或半熔融状态, 再通过高速气流使之雾化, 并以一定的速度喷射和沉积到工件表面, 从而形成各种功能覆盖层的一种表面工程技术^[23]。由于高速熔融粒子撞击到已形成的涂层表面时, 对粗糙表面的不完全填充及粒子之间的不完全结合而形成孔隙。一般认为, 孔隙的形成有以下几种原因^[24]: 熔融粒子打在先前沉积粒子上面飞溅而导致的“屏蔽效应”, 变形粒子间不完全重叠, 气孔的形成和凝固收缩等。孔隙按其存在形式又可分为表面孔隙、封闭孔隙和贯穿性孔隙。

2.2 影响孔隙形成的因素

热喷涂涂层形成的工艺过程决定了涂层中的孔隙是不可避免的。近年来, 人们从基体表面粗糙状态和喷涂参数方面入手, 研究了影响孔隙形成的因素。研究发现, 基体表面的粗糙度会对孔隙的形成产生影响, 若粗糙度在纳米级范围内, 则粗糙度越大, 涂层孔隙率越低; 若粗糙度在微米级范围内, 则粗糙度越小, 涂层孔隙率越低。当基体表面有深凹坑, 且凹坑内存在空气或其他气体时, 容易形成孔隙并发生涂层结合不良现象^[25]。喷涂参数对涂层孔隙率的影响因材料的不同而异。姜超平等人^[26]研究发现, 喷涂距离对 Fe 基非晶涂层孔隙率的影响存在一个最佳值, 喷涂距离过大或过小都会增加涂层的孔隙率; 等离子喷涂电流的升高会降低涂层的孔隙率, 使涂层微观结构更加致密; 气体流量对涂层孔隙率的影响不明显。此外, 喷涂角度、送粉率及粉末颗粒度也会对涂层孔隙的形成产生一定的影响^[27], 具体的影响视材料成分而定。但是, 这些研究仅以某一具体参数为重点进行定性研究, 缺乏一定的系统性, 而且研究主要集中在对涂层孔隙率的影响, 对孔隙的形状、大小、分布和形成过程的研究仍然缺乏。

3 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性与孔隙的关系

通过大量的研究发现, Fe 基非晶涂层的耐腐蚀性受非晶含量、涂层中的氧化夹杂物、涂层与基体及涂层与涂层之间的润湿性和涂层的微观结构 (即孔隙缺陷) 等因素的综合影响。但是在其他因素可控的范围内, 涂层中的孔隙缺陷仍然是影响涂层耐腐蚀性的关键因素, 也是 Fe 基非晶涂层在腐蚀防护领域应用的一大挑战。近年来, 热喷涂 Fe 基非晶涂层的耐腐蚀性与孔隙之间的关联性成为了人们研究的热点之一。

刘光等人^[28]研究低压等离子喷涂 Fe 基非晶涂层的耐腐蚀性时发现, 腐蚀常发生于熔化不良的球形粒子周围, 此处往往存在较明显的孔隙, 而熔化充分、变形良好的粒子周围不容易形成腐蚀坑洞。周正等人^[29]研究超音速火焰喷涂 Fe 基非晶涂层时发现同样现象, 即腐蚀现象发生在涂层粒子搭接不致密处。G. Y. Koga 等人^[30]对比了非晶薄带、半晶化薄带、超音速火焰喷涂涂层和低速火焰喷涂涂层的耐腐蚀性能, 在酸性溶液和碱性溶液中, 非晶薄带都表现出最优异的耐腐蚀性能, 而低速火焰喷涂的涂层具有相对较高的孔隙率, 因而其耐腐蚀性能最差。Kim 等人^[31]研究表明, 涂层表面裂纹贯穿到孔隙处容易导致涂层脱落, 并且在盐溶液中, 形成的腐蚀产物往往集中于涂层表面的孔隙处。

尽管大量的研究表明, 孔隙的存在的确降低了 Fe 基非晶涂层的耐腐蚀性, 然而, 这些研究主要以涂层的孔隙率作为研究重点, 孔隙率仅代表涂层的密实程度, 还应进一步研究孔隙的大小、形状和分布对涂层耐腐蚀的影响, 找到孔隙对涂层耐腐蚀性的影响机制。Zhang 等人^[32]利用三维 X 射线扫描技术, 研究了 Fe 基非晶合金涂层孔隙率以及孔隙的大小、尺寸和分布等因素对涂层腐蚀性能的影响, 发现孔隙在涂层三维空间中呈均匀分布, 在电化学腐蚀体系中, 贯穿性孔隙容易引起阳极电流急剧增加, 导致涂层耐腐蚀性下降, 并且贯穿性孔隙与涂层的厚度密切相关, 当涂层的厚度达到 240 μm 以后, 涂层中的贯穿性孔隙基本消除, 涂层的耐腐蚀性能显著提高。

Zhang S D^[33]探究了孔隙缺陷与 Fe 基非晶涂层长期腐蚀行为之间的相关性, 为了理解孔隙周围局部电化学特性变化, 测试了具有不同孔隙率的微小涂层样品。结果表明, 孔隙降低了涂层钢的长期耐腐蚀性, 涂层耐腐蚀性的降低主要归因于孔隙周围 Cr:Fe 原子比的显著降低, 并且这些 Cr 贫化区易于高速溶解和触发腐蚀。Zheng^[34]研究了封孔处理对热喷涂 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的影响, 发现封孔处理后, 涂层的耐腐蚀性大大提高, 腐蚀电流密度在封孔处理后减小了

一个数量级,封孔剂可以渗透到涂层内部 50 μm 处左右,使涂层表现出更均匀的耐腐蚀性。封孔剂主要通过提高钝化膜的稳定性来提高涂层的耐腐蚀性能。

通过以上研究发现,孔隙对 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的影响主要体现在以下几个方面:(1)涂层中的孔隙会形成腐蚀通道使腐蚀介质浸入涂层,到达涂层与基体之间的界面处;(2)热喷涂过程中,孔内表面形成的氧化夹杂物会引起涂层成分在孔隙附近发生变化,严重影响钝化膜的稳定性;(3)涂层中的孔隙具有类似于凹坑或缝隙的封闭区域,可加速涂层的局部腐蚀^[35]。

通过认识孔隙缺陷对 Fe 基非晶涂层耐腐蚀性的影响机制和涂层孔隙的产生机理,发现热喷涂涂层中的孔隙缺陷主要由喷涂粉末熔化不良和粒子变形不充分而相互搭接产生的,并且影响其耐腐蚀性能的主要因素是涂层中尺寸较大的裂纹和贯穿性孔隙。因此,为了更好地发挥 Fe 基非晶涂层中非晶合金的优异性能,提高涂层的结合强度、降低涂层的孔隙率是一种有效措施。

4 降低热喷涂 Fe 基非晶涂层孔隙率的方法

目前,常用的降低热喷涂涂层孔隙率的方法有热扩散重熔、自封闭涂层、改进及改善喷涂工艺、封孔剂封孔等^[36]。近年来,等离子喷涂技术从提高粒子的喷射速度、改善受热与熔化状态、减少环境气氛对高温喷射粒子的污染与氧化等方面着手,来提高等离子涂层的质量和降低孔隙率,但是对于非晶涂层来说,改善受热和熔化状态往往会使涂层中的非晶含量发生改变。比如热喷涂陶瓷涂层常用提高基体温度的方法来增加喷涂粒子之间的结合力,降低孔隙率,然而如果将其运用到非晶涂层的制备上,往往会促进非晶合金从亚稳态向稳态转变,导致非晶含量显著降低。近年来,研究者针对非晶合金形成的特性,寻求一些既能增加涂层粒子的变形能力和结合能力,又能保证喷涂粒子具有较高冷却速度的方法,旨在降低涂层孔隙率和保持较高的非晶含量,提高涂层的耐腐蚀性能。

Zhang 等人^[37]研究喷涂粉末粒径对等离子喷涂涂层微观结构与性能的影响时发现,较小粒径粉末制备的涂层微观结构越致密,裂纹和孔隙数量越少,涂层的耐腐蚀性越好。Branagan 等人^[38]优化了超音速火焰喷涂参数后,所得 Fe 基非晶涂层的孔隙率从 3.4%降低到 0.06%,其耐腐蚀性大幅度提高。姜超平等系统地研究了喷涂参数对等离子喷涂 Fe 基非晶涂层的微观结构、性能、非晶含量和孔隙率的影响,发现气体流量对涂层非晶含量和孔隙率的影响不明显,适当增加喷涂功率可使等离子喷涂 Fe 基非晶涂层的结

构致密,但会伴随着非晶含量的降低。

贺定勇^[39]在热喷涂线材粉芯中加入稀土,结果发现,由于稀土是表面活性物质,它可降低熔滴的表面张力,提高熔化粒子的流动性、粒子与基材以及粒子间的相互润湿性,降低了涂层的热膨胀系数,减少了涂层内应力,从而降低了孔隙率,提高了涂层的致密度。Zhang 等人^[40]利用 NiCrAl 粉末与一种 Fe 基非晶合金粉末进行相间喷涂,由于 Fe 基材料在 NiCrAl 层上具有较强的润湿性,可增加涂层致密度。另外,较软的 NiCrAl 层可以显著抑制涂层中的裂纹进一步扩展,所以涂层的结合强度可达 40 MPa。Ni/Al 复合粉末在等离子喷涂过程中具有放热特征^[41],发生 $3\text{Ni}+\text{Al}=\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Q}$ 和 $\text{Ni}+\text{Al}=\text{NiAl}+\text{Q}$ 等放热反应,有利于喷涂粒子与基体、喷涂粒子之间产生微区冶金结合,产生“自粘结”效应,不仅能提高涂层的结合强度,而且可以增加其致密度。

姜超平等^[42]通过向等离子喷涂 Fe 基非晶涂层中加入 Mo 粉来制备 Fe/Mo 复合涂层,由于 Mo 合金具有良好的导热性、自粘接性和较低的热膨胀系数等特点,Mo 粉末的加入改善了 Fe 基非晶粉末的熔融程度,因此所获得的复合涂层具有致密的微观结构,孔隙率显著降低。李长久等人^[43]设计了 Mo 包覆 NiCr 粒子壳-核结构复合粉末,通过等离子喷涂技术在材料表面制备了微观结构致密和结合强度优异的复合涂层。由于 Mo 的高熔点和导热性好,用 Mo 作包覆层不仅能改善喷涂粒子的熔融状态,增加其铺展变形能力,又能防止芯部粒子的氧化和脱碳,并且外层 Mo 既能诱导基体微熔,增加涂层与基体的强度,又能使涂层之间发生异质生长现象,产生“自粘结”效应,降低涂层的孔隙率。

5 结语

热喷涂 Fe 基非晶涂层因其典型的层状堆积结构,导致涂层存在一定量的孔隙,易于形成腐蚀通道,降低了涂层整体的耐蚀性能。通过对热喷涂涂层的形成过程与孔隙形成原因进行分析,粒子铺展变形能力差是显著影响涂层形成时粒子相互嵌套叠加,增加涂层孔隙率的主要原因。传统的改善受热和熔化状态的方法虽然能有效降低涂层的孔隙率,但往往会使涂层中的非晶含量发生改变。为保证涂层非晶含量和降低涂层孔隙率,热喷涂 Fe 基非晶涂层可从以下方面来降低孔隙率,提高耐腐蚀性:(1)设计合理的喷涂粉末成分、粒度,优化喷涂工艺参数;(2)在喷涂粉末中加入第二项元素,如稀土元素,改善涂层与基体、涂层与涂层之间的润湿性,研究添加粒子与 Fe 基非晶粒子变形能力之间的关系;(3)采用激光快速重熔对涂层微表层进行重熔处理,消除腐蚀溶液向涂层内

部渗透的渠道,实现对Fe基非晶涂层的微观结构调控,改善涂层整体的耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 冯立超, 贺毅强, 乔斌, 等. 金属及合金在海洋环境中的腐蚀与防护[J]. 热加工工艺, 2013(24): 13—17.
FENG Li-chao, HE Yi-qiang, QIAO Bin, et al. Corrosion and Protection of Metals and Alloys in Marine Environment [J]. Hot Working Technology, 2013 (24): 13—17.
- [2] GUO R Q, ZHANG C, YANG Y, et al. Corrosion and Wear Resistance of a Fe-based Amorphous Coating in Underground Environment[J]. Intermetallics, 2012, 30 (30): 94—99.
- [3] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. 物理学进展, 2013, 33(5): 177—351.
WANG Wei-hua. Essence and Properties of Amorphous Materials [J]. Progress in Physics, 2013, 33 (5): 177 —351.
- [4] SURYANARAYANA C, INOUE A. Iron-based Bulk Metallic Glasses[J]. International Materials Reviews, 2013, 58(3): 131—166.
- [5] INOUE A, TAKEUCHI A. Recent Development and Application Products of Bulk Glassy Alloys [J]. Acta Materialia, 2011, 59(6): 2243—2267.
- [6] GUO S F, PAN F S, ZHANG H J, et al. Fe-based Amorphous Coating for Corrosion Protection of Magnesium Alloy[J]. Materials & Design, 2016, 108: 624—631.
- [7] 王泽华, 王长浩, 周泽华, 等. 高温反应合成金属-陶瓷复合涂层技术的研究现状[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 115—119.
WANG Ze-hua, WANG Chang-hao, ZHOU Ze-hua, et al. Study on Composite Metal-Ceramic Composite Coating at High Temperature [J]. Surface Technology, 2012, 41 (3): 115—119.
- [8] 夏铭, 王泽华, 柏芳, 等. 反应等离子喷涂 TiN 涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 1—8.
XIA Ming, WANG Ze-hua, BAI Fang, et al. Advances in the Research of Reactive Plasma Spraying TiN Coatings [J]. Surface Technology, 2015, 44 (8): 1—8.
- [9] 张红松, 王富耻, 马壮, 等. 等离子涂层孔隙研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 16—18.
ZHANG Hong-song, WANG Fu-chi, MA Zhuang, et al. Progress in the Study of Plasma Coating Pore [J]. Materials Review, 2006, 20(7): 16—18.
- [10] 吴若梅, 孙兆飞, 连运增, 等. 饱和聚酯辊涂工艺参数对涂层性能的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 36—39.
WU Ruo-mei, SUN Zhao-fei, LIAN Yun-zeng, et al. Effect of Saturated Polyester Roller Coating Process Parameters on Coating Performance[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 36—39.
- [11] LU W, WU Y, ZHANG J, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Plasma Sprayed Fe-based Alloy Coating as an Alternative to Hard Chromium[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(5): 1063—1070.
- [12] HASHIMOTO K, MASUMOTO T. Extremely High Corrosion Resistance of Chromium-containing Amorphous Iron Alloys [J]. Materials Science & Engineering, 1976, 23(2/3): 285—288.
- [13] HABAZAKI H, KAWASHIMA A, ASAMI K, et al. ChemInform Abstract: The Corrosion Behavior of Amorphous Fe-Cr-Mo-P-C and Fe-Cr-W-P-C Alloys in 6 mol/L HCl Solution[J]. Chem Inform, 1992, 23(12): 21.
- [14] GEBERT A, RAO R V S, WOLFF U, et al. Corrosion Behaviour of the $Mg_{65}Y_{10}Cu_{15}Ag_{10}$ Bulk Metallic Glass[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 375—377(1): 280—284.
- [15] 张欢, 谢有桃, 郑学斌, 等. 喷涂粉体粒径对铁基非晶涂层腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2015(6): 105—108.
ZHANG Huan, XIE You-tao, ZHENG Xue-bin, et al. Effect of Particle Size on the Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Coatings [J]. Hot Working Technology, 2015(6): 105—108.
- [16] ZHANG C, GUO R Q, YANG Y, et al. Influence of the Size of Spraying Powders on the Microstructure and Corrosion Resistance of Fe-based Amorphous Coating[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(18): 6380—6388.
- [17] QIN Y, WU Y, ZHANG J, et al. Optimization of the HVOF Spray Parameters by Taguchi Method for High Corrosion Resistant Fe-based Coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(7): 1—8.
- [18] 王刚, 陈静, 黄仲佳, 等. 喷涂距离对热喷涂非晶合金涂层组织和腐蚀性能的影响[J]. 功能材料, 2016, 47(6): 185—189.
WANG Gang, CHEN Jing, HUANG Zhong-jia, et al. Effect of Spraying Distance on Microstructure and Corrosion Properties of Thermal Spraying Amorphous Alloy Coatings [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47 (6): 185—189.
- [19] ZHANG H, HU Y, HOU G, et al. The Effect of High Velocity Oxy Fuel Spraying Parameters on Microstructure, Corrosion and Wear resistance of Fe-based Metallic Glass Coatings[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2014, 406: 37—44.
- [20] 蒋建敏, 傅斌友, 贺定勇, 等. 电弧喷涂制备含非晶/纳米晶涂层及其性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2007(S1): 56—60.
JIANG Jian-min, FU Bin-you, HE Ding-yong, et al. Preparation of Amorphous / Nanocrystalline Coatings by Arc Spraying and Their Properties [J]. Nonferrous Metals (Melt Processing Section), 2007 (S1): 56—60.
- [21] XIANG L, YAN B, DONG P, et al. Crystallization and Electrochemical Corrosion Behaviors of Amorphous Fe-based Alloys in NaCl Solution[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 962 — 963.
- [22] QIN Y J, WU Y P, ZHANG J F, et al. Long-term Corrosion Behavior of HVOF Sprayed FeCrSiBMn Amorphous/Nanocrystalline Coating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1144—1150.
- [23] 杨忠须, 刘贵民, 闫涛, 等. 热喷涂 Mo 及 Mo 基复合涂

- 层研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 20—30.
- YANG Zhong-xu, LIU Gui-min, YAN Tao, et al. Advances in the Study of Thermal Sprayed Mo and Mo Based Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 20—30.
- [24] 王震林, 韩勇. 金属热喷涂技术及其应用[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1992.
- WANG Zhen-lin, HAN Yong. Metal Thermal Spraying Technology and Its Application [M]. Beijing: Textile Industry Press, 1992.
- [25] AHMED N, BAKARE M S, MCCARTNEY D G, et al. The Effects of Microstructural Features on the Performance Gap in Corrosion Resistance between Bulk and HVOF Sprayed Inconel 625[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(14): 2294—2301.
- [26] 姜超平. 等离子喷涂铁基非晶涂层结构与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- JIANG Chao-ping. Plasma Sprayed Iron-based Amorphous Coating Structure and Performance Research [D]. Chang'an: Chang'an University, 2015.
- [27] 马丁, Irvin. 高速锻喷涂改善热喷涂涂层的致密性[J]. 国外机车车辆工艺, 2000(4): 21—23.
- MARTIN, IRVIN. High-speed Forging Spraying to Improve the Thermal Spray Coating Density [J]. Foreign Rolling Stock Technology, 2000(4): 21—23.
- [28] LIU Guang, AN Yu-long, GUO Zhi-hong, et al. Structure and Corrosion Behavior of Iron-based Metallic Glass Coatings Prepared by LPPS[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(14): 5380—5386.
- [29] ZHOU Z, WANG L, WANG F C, et al. Formation and Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Metallic Coatings by HVOF Thermal Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(5): 563—570.
- [30] KOGA G Y, NOGEEIRA R P, ROCHE V, et al. Corrosion Properties of Fe-Cr-Nb-B Amorphous Alloys and Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 254(10): 238—243.
- [31] KIM Y J, JANG J W, LEE D W, et al. Porosity Effects of a Fe-based Amorphous/Nanocrystals Coating Prepared by a Commercial High Velocity Oxy-fuel Process on Cavitation Erosion Behaviors[J]. Metals and Materials International, 2015, 21(4): 1—5.
- [32] ZHANG S D, ZHANG W L, WANG S G, et al. Characterisation of Three-dimensional Porosity in an Fe-based Amorphous Coating and Its Correlation with Corrosion Behaviour[J]. Corrosion Science, 2015, 93: 211—221.
- [33] ZHANG S D, WU J, QI W B, et al. Effect of Porosity Defects on the Long-term Corrosion Behaviour of Fe-based Amorphous Alloy Coated Mild Steel[J]. Corrosion Science, 2016, 110: 57—70.
- [34] WANG Y, JIANG S L, ZHENG Y G, et al. Effect of Porosity Sealing Treatments on the Corrosion Resistance of High Velocity Oxy Fuel (HVOF) Sprayed Fe-based Amorphous Metallic Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(6): 1307—1318.
- [35] BURSTEIN G T, LIU C, SOUTO R M, et al. Origins of Pitting Corrosion[J]. British Corrosion Journal, 2004, 39(1): 25—30.
- [36] 于惠博, 孙宏飞, 武彬, 等. 降低涂层孔隙率的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 68—71.
- YU Hui-bo, SUN Hong-fei, WU Bin, et al. Progress in Reducing Coating Porosity [J]. Materials Review, 2007, 21(1): 68—71.
- [37] ZHANG H, XIE Y, HUANG L, et al. Effect of Feedstock Particle Sizes on Wear Resistance of Plasma Sprayed Fe-based Amorphous Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 495—502.
- [38] BRANAGAN D J, SWANK W D, HAGGARD D C, et al. Wear-resistant Amorphous and Nanocomposite Steel Coatings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(10): 2615—2621.
- [39] 贺定勇, 王道. 含稀土元素的奥氏体不锈钢型耐腐蚀热喷涂粉芯线材的研究[J]. 北京工业大学学报, 1998(3): 71—75.
- HE Ding-yong, WANG Dao. Study on Austenitic Stainless Steel Corrosion Resistant Thermal Spraying Powder Core Rod Containing Rare Earth Elements [J]. Journal of Beijing University of Technology, 1998(3): 71—75.
- [40] ZHANG C, ZHOU H, LIU L. Laminar Fe-based Amorphous Composite Coatings with Enhanced Bonding Strength and Impact Resistance[J]. Acta Materialia, 2014, 72(7): 239—251.
- [41] 郭永明, 王海军, 谢兆钱, 等. 超音速等离子制备 Al/Ni 涂层的性能特点[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4): 73—76.
- GUO Yong-ming, WANG Hai-jun, XIE Zhao-qian, et al. Characteristics of Al / Ni Coating Prepared by Supersonic Plasma [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4): 73—76.
- [42] 姜超平, 邢亚哲, 郝建民. Mo 基合金粉末对 Fe 基非晶涂层耐蚀性能影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(8): 144—146.
- JIANG Chao-ping, XING Ya-zhe, HAO Jian-min. Effects of Mo-based Alloy Powder on Corrosion Resistance of Fe-based Amorphous Coatings [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(8): 144—146.
- [43] TIAN J J, YAO S W, LUO X T, et al. An Effective Approach for Creating Metallurgical Self-bonding in Plasma Spraying of NiCr-Mo Coating by Designing Shell-Core Structured Powders[J]. Acta Materialia, 2016, 110: 19—30.