

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.08.011

激光熔覆高性能非晶复合涂层的研究现状与分析

张好强¹, 张哲远¹, 刘印¹, 何丽娜², 侯锁霞^{1*}

(1. 华北理工大学机械工程学院, 河北唐山 063210; 2. 唐山中茂科技有限公司, 河北唐山 064300)

摘要: 本文基于非晶涂层在材料保护和材料应用等方面具有优异的耐磨、耐腐蚀和力学性能的独特优势。介绍了国内外利用激光熔覆技术制备非晶复合涂层的研究现状。阐述了非晶复合涂层的制备和强化方式, 归纳了激光熔覆工艺参数、熔覆合金元素种类与含量、不同添加材料等因素对非晶复合涂层形成及性能的影响, 对比了不同参数和材料选择下显微硬度、摩擦学和耐腐蚀性能的差异, 对非晶相与晶相的强化作用机理进行了探讨, 并对激光熔覆制备高性能非晶复合涂层的未来发展进行了展望。

关键词: 激光熔覆; 非晶复合涂层; 显微硬度; 耐磨性; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

Research status and analysis of laser cladding high performance amorphous composite coatings

Zhang Haoqiang¹, Zhang Zheyuan¹, Liu Yin¹, He Lina², Hou Suoxia^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Tangshan Zhongmao Technology Co., Ltd., Tangshan 064300, China)

Abstract: Based on the unique advantages of amorphous coatings in material protection and material application, such as excellent wear resistance, corrosion resistance and mechanical properties, the research status of amorphous composite coatings prepared by laser cladding technology at home and abroad was introduced in this paper. The preparation and strengthening methods of amorphous composite coatings were described. The influence of the laser cladding process parameters, types and contents of the cladding alloy elements and different additive materials on the formation and properties of amorphous composite coatings were summarized. The differences of microhardness, tribology and corrosion resistance under different parameters and materials were compared. The strengthening mechanism of amorphous phase and crystalline phase was discussed and the future development of high-performance amorphous composite coatings prepared by laser cladding was prospected.

Keywords: laser cladding; amorphous composite coating; microhardness; wear resistance; corrosion resistance

收稿日期: 2022-10-02

修回日期: 2022-11-21

作者简介: 张好强(1979—), 男, 博士, 教授, email: haoqiang790914@163.com

*通信作者: 侯锁霞, email: housuoxia@163.com

基金项目: 河北省自然科学基金项目(项目编号: E2021209026)

非晶合金同时具有金属和玻璃的性质,也被称为金属玻璃^[1]。由于其独特的长程无序、短程有序的组织结构,缺少晶界、位错,因而具有比许多传统材料更加优异的性能,如优良的力学性能、耐磨性和耐腐蚀性能等^[2]。在军事军工、数码电子、生物医药、石油化工、农业生产等领域有着巨大的发展潜力^[3-4]。非晶合金材料在室温下塑性较差,与具有滑移带的晶体不同,由于非晶合金特殊的原子结构,它很难变形,变形仅限于高度集中的剪切带。当非晶合金处于拉伸应力状态时,一旦剪切带形成并迅速膨胀,在达到屈服极限之前就会发生脆性断裂,严重限制其在工业领域的发展^[5]。常见的非晶合金多为细条状和长棒状,大尺寸的块状非晶合金难以生产。由于非晶态合金属于亚稳态,其形成需要极快的冷却速率,对制备技术提出了极高的要求。

与大块非晶合金不同,非晶复合涂层的非晶相含量保持在一定比例,同时,其内部晶相和纳米晶的均匀分布能有效抑制裂纹的萌生和扩展,显著提高涂层在室温下的塑性和韧性。非晶复合涂层以其更加优异的摩擦学、化学和力学性能,在增材制造等方面颇具前景。激光熔覆作为制备非晶复合涂层的重要表面改性技术之一,结合其冷却速率快和热输入量小的优势,在动态冶金过程中易获得性能优异的涂层,受到众多从业者的青睐^[6]。通过激光熔覆技术制备非晶复合涂层不仅以极高的冷却速率提高了非晶形成能力,保留了非晶相的性能优势,还通过引入增强相,有效改善了塑性差的缺点^[7-8]。

本文综述了非晶复合涂层的制备原理,重点讨论了熔覆工艺参数、熔覆合金元素种类与含量、外加第二相等因素对非晶涂层显微硬度、摩擦学性能和耐腐蚀性能的影响,展望未来,为非晶复合涂层发展提供了新思路。

1 非晶复合涂层的制备及强化方式

由于非晶相的天然脆性,非晶合金具有较差的抗断裂性和冲击韧性。因此,需要通过形成复合结构来改变涂层的微观组织,从而改善非晶相涂层的韧性,得到机械性能、耐腐蚀性能、摩擦学性能更加优异的非晶复合涂层。

一方面,可以根据结构设计概念,在非晶涂层中引入层状结构。该结构由两个具有不同物理和机械性能的交替层组成,让非晶层和结晶层交替变换

生成一种多层结构^[9],最后得到具有层状结构的非晶态复合涂层。但这种方式通常涉及复杂的工艺,很难进行大规模的生产。

另一方面,可以通过原位合成或异位合成第二相形成增强相的方式,强化非晶涂层。原位合成就是在确定好材料的合金成分和适当的熔覆工艺后,使基体在冷凝过程直接析出第二相^[10]。异位合成是指直接在熔覆过程中加入不同性能的第二相颗粒,利用第二相与基材间的相互作用,达到对非晶涂层的强化作用^[11],与不含增强相的非晶涂层相比,添加WC、TiC、碳纳米管(CNTs)等颗粒增强的非晶复合涂层具有更好的耐磨和耐腐蚀性能。

2 激光熔覆制备非晶复合涂层性能特点

激光熔覆^[12-14]是一种新型的表面强化和修复工艺,其加工原理如图1所示,利用高功率密度的激光束加热熔化基材表面,经快速冷却熔覆材料,形成具有不同性能和微观结构的涂层,实现基材的表面改性。与其他技术相比,激光熔覆工艺操作简单,在制备非晶复合涂层方面更具优势,稀释率低、功率密度大($10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$)、冷却速率快($10^4 \sim 10^6 \text{ K/s}$)、材料利用率高,且制备的涂层缺陷更少,在保证非晶组织含量的同时,还可有效抑制成形过程中金属间化合物的生成,因此被广泛用于制备具有冶金结合的高性能非晶复合涂层。

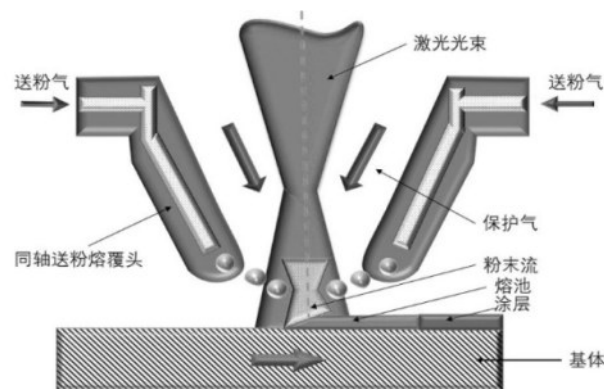


图1 同轴式激光熔覆加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser cladding processing principle

2.1 显微硬度

在力学性能方面,与传统晶态合金相比,非晶合金在凝固过程中几乎不存在微观结构缺陷,这是因为其原子之间的键合能力比晶态合金强很多,同时

均匀而又紧密排列在一起的原子使其在受力过程中很难产生滑移现象。因此,非晶合金具有更高的屈服强度,更大的断裂韧性,较低的杨氏模量以及更大的弹性极限等特点。

非晶复合涂层中较高的非晶相含量与引入的硬质增强相互协同,显著提高了涂层的显微硬度。在激光熔覆技术中,涂层机械性能的差异与激光功率、扫描速度等工艺参数密切相关^[15]。Wang等^[16]在45钢上制备 $(\text{Fe}_{0.497}\text{Cr}_{0.243}\text{Mo}_{0.084}\text{B}_{0.093}\text{C}_{0.084})_{98}\text{Nb}_2$ 非晶复合涂层,发现涂层中非晶含量取决于扫描速度(V),随着 V 的增加,非晶相含量上升,晶粒变得更加细小,还生成了NbC等碳化物增强相,使涂层的硬度显著增高,达到1024 HV,这可归因于细晶强化、弥散强化和非晶强化的共同作用。Wang等^[17]在H13钢上制备了Fe基非晶涂层,结果表明,随着扫描速度的提高,冷却速率上升,抑制了晶核的生长,非晶含量也随之增加,非晶组织与含有硬质相(Cr_{23}C_6 , Mo_2C)的等轴晶使涂层的硬度明显提升。Ibrahim等^[18]发现功率的降低和扫描速度的提高都会增加涂层中的非晶比例,从而提高涂层的显微硬度,然而,当激光功率增加33.33%时,扫描速度需要增加150%~200%才能获得大致相同的微观结构和硬度,表明激光功率对非晶相的形成有更大的影响。Li等^[19]通过对比不同激光功率和搭接率下Fe基非晶复合涂层的综合性能发现,当激光功率为1600 W,搭接率30%时,涂层的显微硬度主要由非晶相和硬质相 B_6Fe_{23} 、 Cr_2B 共同决定,显微硬度高达1315.23 HV。而当功率和搭接率过高时,涂层会出现裂纹和孔洞等缺陷,致使力学性能显著下降。Zhu等^[20]发现激光功率过大会导致熔覆层开裂变形,激光功率过小会导致粉末熔化不足,导致局部起球和孔洞;扫描速度过快导致基体和粉末熔化不充分,扫描速度过慢导致熔覆层过热,从而致使涂层显微硬度显著降低。

熔覆材料中元素的选择与含量的不同也影响着涂层的显微硬度,Wang等^[21]在45钢表面成功制备了FeCrMoCoCBNb非晶复合涂层,研究了Nb元素的含量对非晶形成能力(GFA)和显微硬度的影响。结果表明,添加4%的Nb可以抑制枝晶的产生,从而提高GFA;由于非晶组织和NbC强化相的形成,涂层的显微硬度明显上升。Hou等^[22]选用非晶形成能力强的Fe-Cr-Mo-Co-C-B非晶粉末,成功制备出一种新型Fe基非晶复合涂层,熔覆层为非晶/晶态

复合结构,底部为柱状晶粒区,上部为非晶区;由于非金属元素B和C的添加,使合金体系的稳定性降低,抑制了晶体的生长,从而提高了涂层的非晶含量,在非晶相与晶体增强相的共同作用下,熔覆层的最高硬度约为3Cr13不锈钢基板的6倍,涂层良好的力学性能来源于高的非晶含量和精细的晶体结构。

非晶复合涂层优异的力学性能已得到广泛认可,而在恶劣的工作条件下对工件的性能有了更高的要求,在制备非晶涂层过程中添加增强相,如TiC、SiC、WC等,可以提高涂层的硬度。黄开金等^[23]在钴基非晶粉末中添加了TiC陶瓷粉末,涂层主要由非晶相和金属间化合物组成,当TiC的添加量在10%时,涂层的显微硬度大幅提升。Yue等^[24]对单一非晶涂层与添加SiC颗粒的非晶-纳米晶复合涂层进行了对比,发现SiC不仅通过分解形成碳化物和硅化物增加了涂层的非晶相含量,还可以作为第二相增强非晶涂层的硬度。Xu等^[25]通过激光熔覆制备了WC陶瓷相铁基非晶复合涂层,WC作为硬质颗粒与非晶相相互作用,显著提高了涂层的硬度。

非晶相不存在晶界与位错等缺陷,在承受同等压应力时,与晶体材料在宏观尺度发生位错滑移与塑性变形不同,具有较高非晶含量的涂层变形量更小,硬质强化相与非晶组织共同作用,从而使复合涂层表现出更高的显微硬度。

2.2 摩擦磨损性能

通常,涂层的力学性能与耐磨性能成正比关系,显微硬度越大,局部变形阻力越大,接触力引起的变形就越小,涂层就不易发生开裂和剥离。熔覆粉末的成分对涂层性能有着不同的影响,选用合适的元素作为熔覆材料不仅可以保证涂层非晶相的含量,还可以通过原位生成的增强相,形成致密精细的显微结构增强涂层的力学和摩擦学等性能。Li等^[26]研究发现,适量Cr元素的加入明显改善了显微结构的相分离现象,微观结构由等轴枝晶结构逐渐转变为非晶与晶相的混合结构,有效提高了涂层的耐磨性,但过量的Cr会导致大量脆性金属间化合物的形成,导致摩擦过程中表面形成微裂纹和深槽,显著降低复合涂层的耐磨性。B元素可以减少熔覆过程中熔融颗粒的氧化,从而对涂层的机械性能(如硬度和耐磨性)产生积极影响;Si元素主要用于增强粉末的自熔性,通过与氧反应形成保护性氧化皮,改善材料

的孔洞等缺陷^[27]。李珂尧等^[28]发现当B、Si元素含量为10%时,涂层的非晶相含量最高(约47%),B、Si等小尺寸的非金属元素的添加不仅抑制了柱状晶的生长,使涂层的非晶形成能力大幅提升,还通过生成固溶体和化合物增强了涂层的摩擦学性能。Bai等^[29]通过调控FeCoNiBSiNb中Si元素的含量,成功制备出铁基非晶态/晶态复合涂层,研究发现,适当添加硅元素会抑制枝晶的形成和生长,细化晶粒,使涂层的微观结构更加均匀,高硬度的非晶相作为枝晶的增强剂;在力的作用下,由于枝晶比非晶相软,会在枝晶中引起应力集中,产生裂纹,然而,裂纹的扩展会受到硬质非晶相的阻碍或偏转,使能量耗散,减轻应力集中,改善涂层质量。因此,非晶相与细密枝晶的适当组合可以提高涂层的强度和硬度,从而提高涂层的耐磨性。Nb元素通过抑制晶体的产生,增加了涂层中非晶相的比例,同时,Nb元素还可以与涂层中的元素相互反应,生成NbC等增强相,提升涂层的耐磨性能^[16]。碳纳米管(CNTs)具有管状结构,表现出较高的轴向杨氏模量、较低的径向模量和较低的剪切强度,较高的拉伸强度和弯曲强度使其在磨损过程中与涂层平行滚动,以其特殊的管状结构改善了涂层的韧性,与非晶相相互作用提高了非晶复合涂层的摩擦学性能^[30]。Zhang等^[31]利用激光熔覆技术制备出 $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$ 复合涂层,发现随着激光功率的增加,涂层表面的非晶含量显著增加,当激光功率为4.0kW时,非晶相含量最高;生成的非晶相、固溶体和金属间化合物是涂层的耐磨性能提升的主要原因。

耐磨性作为决定涂层应用的关键因素,非晶合金因其没有晶界、位错、沉淀等结晶缺陷,与具有相同化学成分的部分结晶合金相比,其较高的原子堆积密度导致了更高的显微硬度,有效减少了涂层中颗粒的剥落,非晶相与增强相相互协同,改善了复合涂层的耐磨性能。

2.3 腐蚀性能

涂层的耐腐蚀性能往往与结构和化学成分有关,非晶相特殊的无定形结构,决定了涂层没有晶体类型的缺陷,降低了孔隙率;元素组成中,Cr、Ni、Mo等合金元素的添加不仅可以细化晶粒,提升涂层的非晶形成能力,还可通过在涂层表面生成致密、均匀、稳定的钝化膜,抑制点蚀的侵入,与非晶相一起改善涂层的耐腐蚀性能^[32]。FeCoCrMoCBy非晶一

纳米晶涂层不仅含有非晶相和细密的纳米晶粒,还能通过Cr、Mo等钝化合金元素在NaCl溶液中形成了 Cr_2O_3 钝化膜,使涂层具有优异的耐腐蚀性能^[33]。Xu等^[25]发现由于涂层中形成了大量含有Cr和Mo的结晶相,Cr元素被氧化形成富Cr钝化膜,可以阻碍 Cl^- 的侵蚀,从而降低涂层的腐蚀速率,同时,Mo元素还形成Mo的氧化物,减少Cr在腐蚀液中的溶解,大幅提高涂层的耐腐蚀性能。Li等^[19]制备了Fe-Cr-Mo-B-C非晶复合涂层,发现涂层中Cr、Mo元素通过在非晶合金中形成相应的钝化保护膜,抑制了 Cl^- 的侵入,低的孔隙率和高的非晶相含量使腐蚀电位达到-244 mV,电流密度为 $3.76 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。Yuan等^[30]在45钢轴表面制备了镍包覆碳纳米管/FeSiB非晶复合涂层,发现镀镍碳纳米管在裂纹处的桥接行为,抑制了裂纹的扩散,增加了腐蚀时间,与非晶相一起提高了涂层的耐腐蚀性。陈天雄等^[34]在Zr基板上制备了Zr-Cu-Ni-Al非晶涂层,发现当激光功率为1000 W,扫描速率为800 mm/min时,涂层具有最佳的耐腐蚀性能,其中自腐蚀电位为-0.182 V,电流密度为 $5.2 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。

不同工艺参数和熔覆材料下性能的变化如表1所示。从表1可以看出,在一定范围下,激光功率的降低和扫描速度的提高会使复合涂层中非晶相比例上升,显微硬度显著提高,其中,激光功率的影响更为显著。

此外,不同的熔覆粉末成分和添加材料将会产生不同的强化相,对涂层性能有着决定性的影响。添加适量的C、B、Si等小尺寸的非金属元素可以抑制枝晶的生长,改善涂层的微观组织,减少氧化物、孔洞等缺陷的形成,从而大幅提高涂层的综合性能;但如果添加不当,非晶相与晶相组织的比例会逐渐失衡,会致使产生裂纹和沟槽等缺陷,降低涂层的力学和摩擦学性能;Cr、Mo元素的加入对涂层耐腐蚀性能影响至关重要。综上,向涂层中添加自熔性非金属元素和金属元素可以显著提高非晶含量,非晶相和生成的增强相一起改善涂层的综合性能。因此,要获得更高质量非晶复合涂层,应进一步探索元素对涂层性能的影响,找出最佳的元素组合和含量。

元素类型、工艺参数对确保涂层质量起着至关重要的作用。结合表1本课题组采用同轴式激光熔覆技术在45号钢表面制备了Fe基非晶复合涂层,选用Fe-Cr-Mo-B-Si粉末作为熔覆材料,其中Cr、Mo

作为大尺寸金属元素与类金属元素 B、Si 间的键合作用使得原子团簇比较稳定,当不同元素原子被束缚在其中时,原子难以进行有序排列,与此同时,类金属元素一般原子尺寸较小,这使得体系中的原子尺寸差变大,混乱度增强,非晶形成能力显著提高,与生成的 $\text{Fe}_3(\text{B}, \text{Si})$ 、 $\text{Mo}_5\text{Cr}_6\text{Fe}_{18}$ 等增强相共同提高

了涂层的力学和摩擦学性能。通过调控工艺参数和优化合金元素含量,得出,当激光功率 1600 W,扫描速度 4 mm/s 时涂层成形良好,没有裂纹和孔洞等缺陷,涂层与基体间呈冶金结合。当 Cr、Mo 元素质量分数分别为 20% 和 15% 时,涂层均匀分布着非晶相和平面晶、树枝晶、等轴晶等晶相,如图 2 所示。

表 1 不同激光熔覆工艺参数和元素组成下复合涂层的性能

Tab.1 Properties of composite coatings with different laser cladding process parameters and elemental composition

基材	涂层	强化相	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	显微硬度/HV	摩擦系数	腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)	参考文献
低碳钢	NiFeBSiNbC	NbC	2750	40.0	1187.00	—	—	[35]
Q235 钢	FeCrMoCBY	M_{23}C_6 (M=Fe, Cr)	4500	50.0	1353.00	—	—	[36]
	FeCrMoNiBSi	MoSi_2	1500	20.0	1102.60	0.380	2.216×10^{-7}	[37]
	FeCrMoBSi	$\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Mo}_5\text{C}_{16}\text{Fe}_{18}$	1000	13.3	1400.00	0.450	—	[28]
45 号钢	FeCrMoBCNb	NbC	4000	15.0	1024.00	—	1.397×10^{-6}	[16]
	FeCrMoMnWBCSi	M_{23}C_6 、 $\text{Cr}_{9.1}\text{Si}_{0.9}$	2500	4.0	754.00	—	1.470×10^{-5}	[25]
	FeCrMoCoCBNb	$(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$	1600	30.0	1200.00	—	—	[21]
	FeCrMoBC	B_6Fe_{23} 、 Cr_2B	1400	10.0	1315.23	0.404	3.796×10^{-6}	[19]
3Cr13 钢	FeMoCrCoCBYSi	Mo_2C	1000	8.0	1300.00	—	—	[38]
	FeMoCrCoCB	M_{23}C_6 、 Cr_7C_3	500	10.0	1100.00	0.112	—	[39]
304L 不锈钢	FeCrBSiNi	Fe_{23}B_6 、CrB	2200	10.0	792.20	—	—	[40]
H13 钢	FeCrMoCoCB	Cr_{23}C_6 、 Mo_2C	2200	100.0	1200.00	—	1.771×10^{-6}	[17]
纳米析出高强钢	FeNiSiB	—	1500	3.0	900.00	—	—	[15]
5083 铝合金	AlNiYCoLa	Al_4NiY	1800	5.0	335.00	—	—	[41]

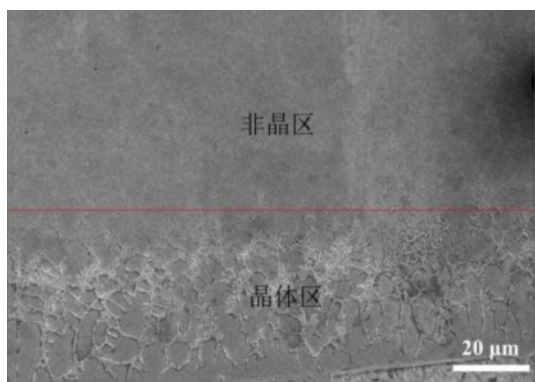


图 2 复合涂层的显微结构

Fig.2 Microstructure of composite coating

在电化学腐蚀中,涂层表层还生成了钝化保护膜,抑制了点蚀的侵入,增强了涂层的耐腐蚀性,与表 1 相比,腐蚀电流密度发生了明显的降低,为 $2.802 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$;在兼顾优异耐腐蚀性能的同时,力学与耐磨性能也较为优异,通过非晶相与晶相的协同作用,使涂层的显微硬度高达 1282.8 $\text{HV}_{0.2}$,如图 3 所示,平均摩擦系数仅为 0.39。

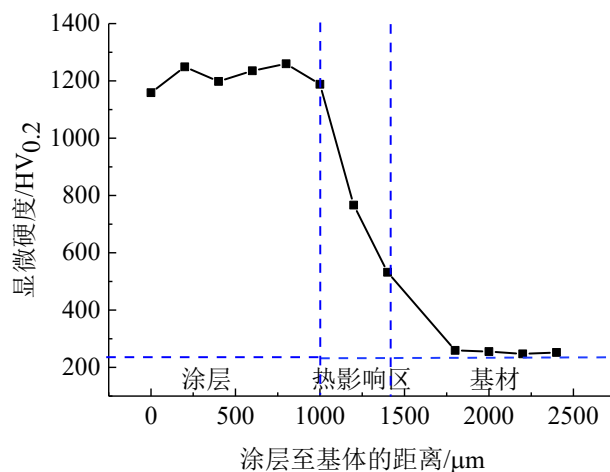


图 3 复合涂层的显微硬度

Fig.3 Microhardness of composite coating

3 总结与展望

非晶复合涂层兼具非晶合金独特的结构优势和不同的晶体强化相的性能特点,在腐蚀、磨损等恶劣工况下,共同作用,显著改善了基材的综合性

能,提高了工件的使用寿命,降低了生产成本,为非晶复合材料的发展和应用提供了新的方向和途径。本文综述了近年来利用激光熔覆技术制备非晶复合涂层的性能对比和强化机理,但是非晶相与晶相共存机制和相互作用机理还需进一步探索和完善。研究发现,工艺参数、元素组成、外加材料作为最重要的三个因素,影响着涂层的微观结构和质量,现阶段非晶复合涂层体系主要集中于Fe基和Zr基,许多体系还没有开发出来,例如Mg基、Al基、Cu基,高熵非晶材料等,不同的涂层体系,体系中不同的元素含量,对涂层性能的影响至关重要,未来应通过成分调控,配制出成分均匀、形状规则、非晶形成能力强的熔覆材料。增强相材料的选择也应更加多样,不应局限于碳化物陶瓷、纤维材料、氧化物陶瓷、氮化物陶瓷等在未来也可以与非晶涂层相互结合,进一步改善涂层的综合性能。人工智能的兴起,带动了表面强化领域的进步,可借助先进的计算机设备,使用建模和仿真方法,为所需涂层选择合适的加工参数和熔覆材料,通过数值模拟热力学和动力学等过程逐步带动产业升级,推动非晶复合材料的可持续发展。

参考文献

- [1] 刘林根,董闯,吴爱民,等.金属玻璃薄膜的研究进展[J].表面技术,2020,49(5):11-18.
- [2] Li F C, Liu T, Zhang J Y, et al. Amorphous-nanocrystalline alloys: fabrication, properties, and applications[J]. Materials Today Advances, 2019, 4: 100027.
- [3] 汪卫华.金属玻璃的过去、现在和未来[J].自然杂志,2022,44(3):173-181.
- [4] Cheng J B, Feng Y, Yan C, et al. Development and characterization of Al-based amorphous coating[J]. Jom, 2020, 72(2): 745-753.
- [5] 刘军,杨湘杰.非晶复合材料的半固态加工技术[J].精密成形工程,2020,12(3):1-11.
- [6] 张春芝,尚希昌,孙晟瑄,等.激光熔覆高性能Fe基非晶涂层的研究进展[J].材料导报,2022,36(15):133-140.
- [7] 王悦,李慧,梁精龙,等.铁基非晶涂层的研究进展[J].电镀与涂饰,2019,38(19):1071-1084.
- [8] Joshi S S, Katakam S, Arora H S, et al. Amorphous coatings and surfaces on structural materials [J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2016, 41(1): 1-46.
- [9] Zhang C, Zhou H, Liu L. Laminar Fe-based amorphous composite coatings with enhanced bonding strength and impact resistance[J]. Acta Materialia, 2014, 72: 239-251.
- [10] 马小昭.原位内生树枝晶增强TiZr基非晶复合材料的组织与力学性能[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [11] 高书刊,王国迪,李江华,等.非晶复合材料制备工艺及应用研究[J].热加工工艺,2022,51(6):6-10.
- [12] Li Y, Dong S, Yan S, et al. Microstructure evolution during laser cladding Fe-Cr alloy coatings on ductile cast iron[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 255-264.
- [13] 曹四龙,王凌倩,周健松.激光熔覆NiCrMo和NiCrBSi涂层的微观组织及摩擦学性能研究[J].材料保护,2021,54(3):1-8,33.
- [14] 张明奇,姜伟,王树奇.激光熔覆Fe基合金涂层的高温磨损性能[J].材料保护,2021,54(6):64-71.
- [15] 侯纪新,章顺虎,蒋小舟,等.激光熔覆工艺参数及微合金元素对Fe基非晶复合涂层显微硬度的影响[J].应用激光,2015,35(4):402-407.
- [16] Wang H Z, Cheng Y H, Zhang X C, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and properties of Fe based amorphous/nanocrystalline cladding coatings [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 250(7): 123091.
- [17] Wang H Z, Cheng Y H, Song W, et al. Research on the influence of laser scanning speed on Fe-based amorphous coating organization and performance[J]. Intermetallics, 2021, 136(5): 107266.
- [18] Ibrahim M Z, Sarhan A A D, Kuo T Y, et al. Characterization and hardness enhancement of amorphous Fe-based metallic glass laser cladded on nickel-free stainless steel for biomedical implant application[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 235: 121745.
- [19] Li C, Zhai J, Tian L, et al. Fabrication of Fe-based amorphous composite coating by laser cladding[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2022, 589: 121648.
- [20] Zhu L D, Xue P S, Qing L, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [21] Wang H Z, Cheng Y H, Yang J Y, et al. Microstructure and properties of laser clad Fe-based amorphous alloy coatings containing nb powder[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 550: 120351.
- [22] Hou X, Du D, Wang K, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-Mo-Co-C-B amorphous composite coatings synthesized by laser cladding[J]. Metals, 2018, 8(8): 622-635.

- [23] 黄开金, 林鑫, 陈池, 等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Zr-Cu-Ni-Al/TiC 复合粉末的组织与磨损[J]. 中国激光, 2007(4): 549-554.
- [24] Yue T M, Su Y P, Yang H O. Laser cladding of $Zr_{65}Al_{17.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$ amorphous alloy on magnesium[J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 209-212.
- [25] Zhou S F, Xu Y B, Liao B Q, et al. Effect of laser remelting on microstructure and properties of wc reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 8-16.
- [26] Li K Y, Liang J, Zhou J S. Preparation and characterization of laser clad FeCrMoBSi amorphous composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 423: 127520.
- [27] 时海芳, 李强, 刘忆. Si 含量对氩弧熔覆 AlCuFeNiC-oSix 高熵合金涂层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 18-22.
- [28] 李珂尧, 周健松, 王凌倩. B, Si 元素对激光熔覆 Fe-Cr-Mo-B-Si 非晶涂层的非晶形成能力及其摩擦学机理的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 192-202.
- [29] Wang Q Q, Bai X D, Sun B, et al. Influence of Si on tribological behavior of laser clad Fe-based amorphous/crystalline composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126570.
- [30] Yuan W, Li R, Zhu Y, et al. Structure and properties of nickel-plated CNTs/Fe-based amorphous composite coatings fabricated by high-speed laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 438: 128363.
- [31] Zhang L, Wang C, Han L, et al. Influence of laser power on microstructure and properties of laser clad co-based amorphous composite coatings[J]. Surfaces and Interfaces, 2017, 6: 18-23.
- [32] 齐玉磊, 杨敏, 董广博, 等. Cr 含量对海水飞溅区混凝土中钢筋耐腐蚀性的影响初探[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 43-49.
- [33] Wang S L, Zhang Z Y, Gong Y B, et al. Microstructures and corrosion resistance of Fe-based amorphous/nano-crystalline coating fabricated by laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 1116-1123.
- [34] 陈天雄, 胡立威, 赵玲, 等. 激光功率对 Zr 基非晶复合涂层微观组织与耐腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(1): 117-122.
- [35] Jin Y J, Li R F, Zheng Q C, et al. Structure and properties of laser-clad Ni-based amorphous composite coatings[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(12): 1206-1211.
- [36] Zhang P, Zhang Q, Yan H, et al. Fabrication, microstructure and micromechanical properties of Fe-based metallic glass coating manufactured by laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126726.
- [37] Cao S, Liang J, Zhou J. Evolution in microstructure features and properties of mo-containing Fe-Cr-Ni-B-Si composite coatings by laser cladding[J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111926.
- [38] Hou X, Du D, Chang B, et al. Influence of scanning speed on microstructure and properties of laser clad Fe-based amorphous coatings[J]. Materials, 2019, 12(8): 1279-1293.
- [39] Hou X, Du D, Wang K, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-Mo-Co-CB amorphous composite coatings synthesized by laser cladding[J]. Metals, 2018, 8(8): 622.
- [40] 朱红梅, 林子钦, 叶炜, 等. 石墨对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 182-187.
- [41] 王晓明, 朱胜, 杨柏俊, 等. 磁场辅助激光熔覆铝基金属玻璃覆层[J]. 航空学报, 2018, 39(11): 231-239.