

引用格式: 张凯, 毛鹏展, 霍嘉翔, 等. 激光熔覆铁基非晶合金复合涂层韧性和塑性研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(10): 954-959.

ZHANG K, MAO P Z, HUO J X, *et al.* Research Progress on Toughness and Plasticity of Laser Cladding Fe-Based Amorphous Alloy Composite Coatings[J]. Materials China, 2025, 44(10): 954-959.

## 激光熔覆铁基非晶合金复合涂层韧性和塑性研究进展

张凯<sup>1,2</sup>, 毛鹏展<sup>1,2</sup>, 霍嘉翔<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 张磊<sup>1,2</sup>, 伏利<sup>1</sup>, 陈小明<sup>1,2,3</sup>

(1. 水利部产品质量标准研究所 浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310012)

(2. 水利部杭州机械设计研究所 水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室, 浙江 杭州 310012)

(3. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 铁基非晶合金因为优异的力学、化学和物理性能, 以及较低的成本, 在工业上非常有应用前景。但铁基非晶合金韧性和塑性欠缺, 一直制约着其在涂层应用领域的发展。为解决这个问题, 研究学者们在激光熔覆制备工艺和材料成分方面进行了大量研究, 以探究非晶相和晶体相双相共存增塑增韧的作用机理, 取得了丰硕的成果。非晶相和晶体相双相共存能有效提高铁基非晶合金复合涂层的韧性和塑性, 晶体相的晶粒尺寸、结构和分布情况都对铁基非晶合金复合涂层的韧性或塑性有较大的影响。对近年来激光熔覆铁基非晶合金复合涂层增塑增韧在激光工艺参数、材料成分和辅助方法方面的研究进展进行了归纳和总结, 分析了目前存在的主要问题, 并展望了未来的发展方向。

**关键词:** 铁基非晶; 激光熔覆; 合金; 复合涂层; 韧性; 塑性

中图分类号: TG174.4; TG178 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)10-0954-06

## Research Progress on Toughness and Plasticity of Laser Cladding Fe-Based Amorphous Alloy Composite Coatings

ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, MAO Pengzhan<sup>1,2</sup>, HUO Jiexiang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>,  
ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, FU Li<sup>1</sup>, CHEN Xiaoming<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Surface Engineering of Equipment for Hydraulic Engineering of Zhejiang Province, Standard & Quality Control Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012, China)

(2. Water Machinery and Remanufacturing Technology Engineering Laboratory of Zhejiang Province, Hangzhou Mechanical Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012, China)

(3. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Fe-based amorphous alloys are promising for industrial applications because of their excellent mechanical, chemical and physical properties and low cost. However, the development of Fe-based amorphous alloys in the field of coating applications has been restricted by the lack of toughness and plasticity. To address this issue, researchers have conducted extensive studies on laser cladding preparation processes and elemental formulations to investigate the mechanism of plasticizing and toughening effects of amorphous and crystalline dual-phase coexistence, yielding fruitful results.

Scholars have pointed out that the coexistence of amorphous phase and crystalline phase can effectively improve the toughness or plasticity of Fe-based amorphous alloy composite coating. The grain size, structure and distribution of crystalline phase have a great influence on the toughness or plasticity of Fe-based amorphous alloy composite coating. In this paper, the research progress of laser cladding iron based amorphous alloy composite coating plasticizing and toughening is summarized in terms of laser process parameters, element formulation and auxiliary

收稿日期: 2022-11-29 修回日期: 2023-12-07

基金项目: 浙江省“一带一路”国际科技合作项目(2019C04019);  
浙江省公益性技术应用研究计划资助项目(LGC22E010008, LGC19E090001)

第一作者: 张凯, 男, 1993年生, 中级工程师

通讯作者: 陈小明, 男, 1983年生, 高级工程师,

Email: xiaoming840@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202211018

methods in recent years. The main existing problems are analyzed, and the future development direction is forecasted.

**Key words:** iron-based amorphous; laser cladding; alloy; composite coating; toughness; plasticity

## 1 前 言

非晶合金因其独特的原子结构：短程有序，长程无序，而且不存在晶界、位错、滑移等晶体缺陷，具有非常优秀的耐腐蚀性能和力学性能<sup>[1-3]</sup>。因此非晶合金在水利水电、海洋装备、航空航天、半导体等领域非常有应用前景<sup>[4-9]</sup>。其中 Fe 基非晶合金因为资源丰富、价格低，同时具有很高的硬度、强度、耐磨损性能和耐腐蚀性能的特点，得到研究学者们的重点关注。但是 Fe 基非晶合金制备过程对临界冷却速度要求较高，制备难度大，同时 Fe 基非晶合金还具有室温脆性的缺点，严重限制了其广泛应用<sup>[10, 11]</sup>。

为了解决上述困难，提高 Fe 基非晶合金涂层的非晶形成能力，研究人员重点研究了超音速火焰热喷涂和激光熔覆技术制备 Fe 基非晶合金涂层的可行性<sup>[12-15]</sup>。这 2 种技术都具有很高的冷却速度，非常契合非晶形成的基体条件。其中激光熔覆技术因为制备的涂层与基体呈冶金结合，结合强度远高于超音速火焰喷涂，所以在工程应用中更具有前景。为了解决 Fe 基非晶涂层的室温脆性问题，国内外研究学者对激光熔覆工艺参数和材料配方进行了大量的研究，研究发现，非晶相和晶体相双相共存并相互作用，能有效提高 Fe 基非晶合金复合涂层的韧性或塑性，是解决 Fe 基非晶涂层室温脆性问题的有效途径。

本文重点总结并分析激光熔覆工艺参数、材料配方和辅助方法在 Fe 基非晶合金复合材料增塑增韧方面的研究，并展望未来的发展方向。

## 2 激光熔覆工艺参数对 Fe 基非晶合金涂层增塑增韧的影响

激光熔覆是一个复杂的一体化冶金过程，包含了光吸收、融传热、传质、熔化和凝固等一系列变化过程。激光束作用时间短，通常是毫秒级，高能量密度激光束会使基材表面和粉末材料迅速升温至熔点以上，而周围区域温度相对较低，热量从熔池向周围区域传导，短时间高温差热传导形成激光熔覆层特有的大温度梯度特征，大温度梯度使得熔覆层组织具有独特的结构特征，即熔覆层组织特征会出现分层，从涂层表面到与基体的界面，依次可能出现一些等轴晶、胞状晶、树枝晶等组织特征<sup>[16]</sup>。目前，激光熔覆制备 Fe 基非晶合金涂层完全阻断晶体的外延生长还比较困难，而非晶化的首要条件就

是阻断晶体的外延生长，所以激光熔覆制备非晶涂层往往得到的是非晶、纳米晶和金属化合物晶体组成的复合涂层<sup>[17]</sup>。但是这个特点对 Fe 基非晶合金复合涂层的塑性或韧性提升具有有益效果。特别是在需要涂层应对高强高频的冲击力作用的应用场景，如：水轮机叶轮、大型船舶桨叶等过流部件，激光熔覆 Fe 基非晶合金复合涂层更具优势。

为此，国内外学者对 Fe 基非晶合金复合涂层增塑增韧在激光熔覆工艺参数方面进行了大量的研究，取得了很多的成果。Basu 等<sup>[18]</sup>尝试在 AISI 4140 基材上激光熔覆  $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Y}_2\text{C}_{15}\text{B}_6$  非晶合金涂层，通过改变激光功率和激光扫描速率，进行了大量的工艺试验，研究了工艺参数对涂层微观结构和涂层性能的影响。通过工艺参数的优化可以改变非晶相和晶体相的比例，提高涂层的耐磨蚀性能和韧性。Zhu 等<sup>[19, 20]</sup>利用激光熔覆在不同工艺参数下制备了 Fe-Ni-B-Si-V 系非晶-纳米晶复合涂层，研究发现涂层微观结构沿着深度方向变化，不同的微观结构有着不同的强度和韧性，大部分非晶相集中在深度 0.4~0.6 mm 的区域，并伴有少量的纳米晶，此区域是强度和韧性最高的区域。

上海交通大学李铸国课题组<sup>[21-24]</sup>开发了 Fe-(Ni, Co)-B-Si-Nb 激光熔覆粉末，研究了激光熔覆扫描速率、功率和激光重熔等激光工艺参数对非晶相和晶体相生成的影响、对涂层力学性能的影响。他们的研究结果表明：① 稀释率和扫描速率是激光熔覆过程中非晶涂层制备的决定性因素，低稀释比和更高的扫描速率可以提高非晶相形成的可能性，通过改变涂层的结晶度可以调控涂层的韧塑性；② 激光重熔后的凝固过程有利于抑制晶粒的生长，降低涂层的结晶度，减小晶粒尺寸，有效调控涂层晶相比例和晶粒尺寸，从涂层断裂形貌可以看出，激光重熔工艺可以改善涂层的脆性断裂；③ 通过纳米压痕测试法发现 Fe-Ni-B-Si-Nb 系非晶纳米晶复合涂层在激光重熔后的非晶纳米晶组织，能有效吸收涂层的变形功，减少涂层裂纹的产生，同时具有较高的硬度和韧塑性。他们研究的典型的涂层形貌如图 1 所示，展示了熔覆层宏观形貌以及沿深度方向微观组织的变化，微观组织可以分为 3 层，分别为 Layer I（柱状枝晶）、Layer II（等轴枝晶和一些白色颗粒）和 Layer III（灰色基质和许多白色颗粒）；Layer I 特征示意图如图 1e 中①所示，Layer II 特征示意图如图 1e 中②所示，Layer III 特征示意图如图 1e 中③所示；图 1c 中区域 A 的平均成

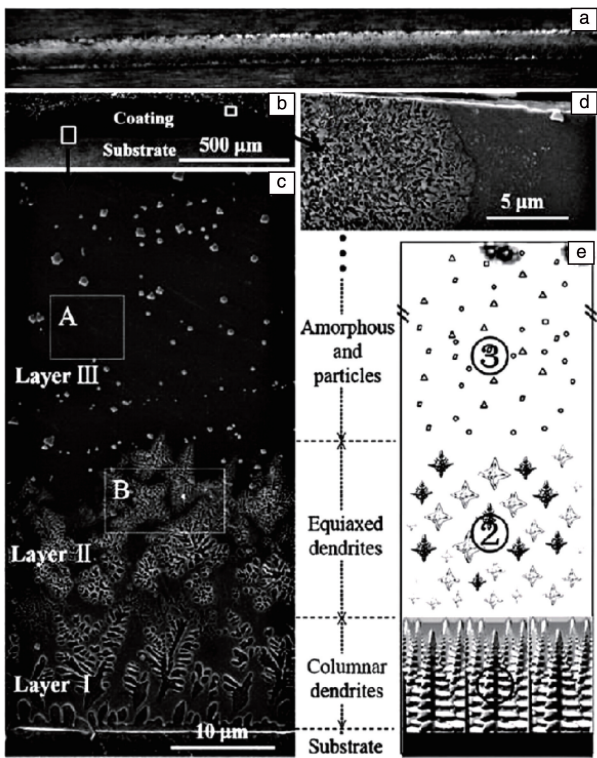


图 1 Fe-(Ni,Co)-B-Si-Nb 激光熔覆涂层典型形貌<sup>[23]</sup>: (a)涂层的宏观结构照片, (b)横截面的 SEM 照片, (c)涂层/基体界面附近涂层的微观结构, (d)涂层顶部的微观结构, (e)分级涂层的示意图

Fig. 1 Typical morphology of the Fe-(Ni,Co)-B-Si-Nb coatings fabricated by laser cladding<sup>[23]</sup>: (a) macrostructure of the coating, (b) SEM image of the cross-section, (c) microstructure of the coating near the interface of coating/substrate, (d) microstructure of the top of the coating, (e) schematic illustration of the graded coating

分为  $Fe_{36}Co_{35}B_{16}Si_6C_3Nb_4$ , 区域 B 的平均成分为  $Fe_{58}Co_{23}B_8Si_5C_4Nb_2$ (皆为原子分数, %), 区域 A 的成分与激光熔覆粉末成分很接近, 区域 B 中 Fe 元素含量较高, 这说明激光熔覆过程中 Fe 元素从基体向涂层扩散, 由于这些成分变化, 涂层微观结构形成了非晶态与晶态异质结构。涂层不同区域的 XRD 测试结果如 2 所示, 从图 2 中可以看出, 灰色基质为非晶组织, 白色颗粒为 NbC。

中国石油大学王彦芳课题组<sup>[25-27]</sup>系统研究了 Fe 基非晶合金熔覆层相组成、微观组织结构以及 Fe 基非晶的形成机制, 建立了激光熔覆工艺参数物理和数学模型, 得到了激光熔池沿深度方向的温度梯度及冷却速率的变化规律, 揭示了 Fe 基非晶复合涂层中晶体相的生长机制和细化机制; 揭示了激光扫描速率等激光工艺参数对晶体外延生长和细化调控的规律, 以及 Fe 基非晶合金中晶体相晶粒细化对涂层韧性和塑性的有益效果。Mojaver 等<sup>[28]</sup>研究了  $Fe_{49}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_3$  涂层完全非晶化的可能性, 发现了激光功率和扫描速率对  $Fe_{49}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_3$  涂层非晶相比例有非常重要的影响, 涂层成分变化和裂纹成长受到激光热输入和熔化比变化的影响, 并指出涂层有多个区域是非晶相和超细晶粒相混合的, 这些区域的裂纹成长明显得到抑制, 断裂韧性明显提高。

综上所述, 激光熔覆制备 Fe 基非晶合金复合涂层时, 涂层完全非晶化很困难, 大概率会得到非晶相与晶体相共存的双相结构涂层。激光熔覆的工艺参数(激光功率、扫描速率、激光重熔等)对涂层组织结构和成分的特征有非常大的影响, 例如非晶相和晶体相的比例、晶体相的晶粒尺寸、晶体相与非晶相的界面结合方式、双相结构非晶涂层的断裂失效作用等。

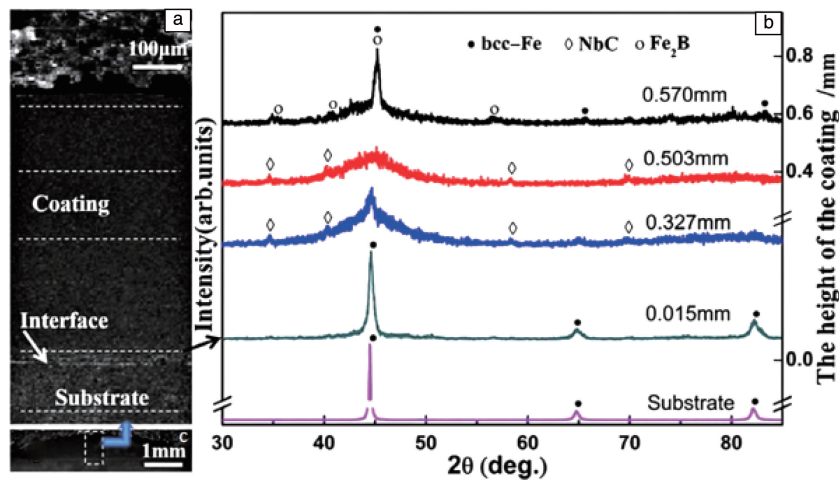


图 2 涂层在距涂层/基材界面不同距离处的 XRD 图谱<sup>[23]</sup>

Fig. 2 XRD patterns of the coating at different distances from the interface of coating/substrate<sup>[23]</sup>

涂层的塑性和韧性与涂层组织结构的变化有直接的联系。比如：① 晶体相比比例在合适范围内增长，会使涂层的塑性或韧性得到提高；② 调控晶体相和非晶相的界面结合方式和分布特征能有效阻碍涂层受力时的裂纹扩展，从而有效提高涂层的韧性和塑性；③ 晶粒尺寸变小，会有效提高 Fe 基非晶合金复合涂层的强度和韧性；当晶粒尺寸达到纳米尺度，涂层的强度和韧性相比于微米级晶粒尺寸会有明显的提升。

### 3 材料成分对 Fe 基非晶合金涂层增塑增韧的影响

Fe 基非晶合金涂层是脆性非晶合金涂层的代表，宏观上几乎不显示室温变形，一般一超过弹性极限就会发生断裂，其塑性应变通常小于 0.2%<sup>[29]</sup>。为了充分发挥其优点，使之得到广泛应用，研究学者们基于材料成分设计研究涂层中生成的特殊结构晶相对 Fe 基非晶合金涂层的韧性和塑性的影响，并进行了大量的研究工作，取得了一些成果。

2000 年，Hays 等<sup>[30]</sup>在 Zr 基非晶涂层研究中发现了具有 BCC 结构的延展性结晶  $\beta$  相 Ti-Zr-Nb，在外加机械载荷作用下，复合涂层的失效塑性应变和抗冲击韧性明显增加。之后 2006 年，Shen 等<sup>[31]</sup>通过向 FeCoBSiNb 非晶合金中引入 Cu，使 FeCoBSiNb 非晶合金中析出了  $\alpha$ -(Fe, Co) 塑性相，明显增加了合金的屈服强度，同时合金的塑性应变能力也提升了 0.6%。这为学者们进一步的研究提供了重要参考。Makino 等<sup>[32]</sup>研究了 Cu 对 Fe-Si-B-P 非晶合金的塑性影响，结果表明，Fe-Si-B-P 非晶合金的塑性变形提升到 3.1%，并在断裂界面观察到高密度的多条剪切带，主要原因是非晶相中镶嵌的原位形成的纳米晶  $\alpha$ -Fe (晶粒尺寸小于 10 nm) 的作用。Guo 等<sup>[33]</sup>基于成分设计，研发出原位形成的韧性  $\alpha$ -Fe 枝晶增强的 Fe 基非晶复合材料，该复合材料表现出 37.5% 的压缩塑性应变和 3.0 GPa 的高断裂强度。研究表明，塑性的显著增强是由于剪切带和  $\alpha$ -Fe 枝晶之间的强烈相互作用，阻断了主剪切带的快速传播，促进了多个剪切带的产生。如图 3 箭头所示，枝晶相和剪切带之间的相互作用一方面阻碍了它们的快速传播，另一方面诱导了剪切带的分叉和增殖，从而提高了涂层整体的塑性。

Poon 等<sup>[34]</sup>通过采用合适的熔覆温度 (熔覆温度高于 Fe 的熔点，低于 TiC、NbC 等陶瓷颗粒熔点温度) 在非晶合金钢表面掺入硬质陶瓷颗粒，研究了其力学性能变化，结果表明，硬质颗粒的加入使复合材料的刚度、剪切模量和泊松比都有明显的增强。

综上所述，从材料成分角度，基体特殊元素反应，

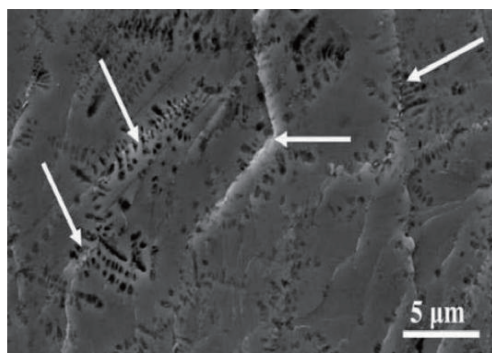


图 3 在塑性变形过程中 Fe 基非晶复合材料的  $\alpha$ -Fe 枝晶和剪切带之间的相互作用<sup>[33]</sup>

Fig. 3 Interactions between  $\alpha$ -Fe dendrites and shear bands of the Fe-based amorphous composite materials during plastic deformation<sup>[33]</sup>

Fe 基非晶合金材料韧性塑性增强的原理主要是通过合成特殊结构晶体相或者外加特殊晶体相的方法，来抑制非晶合金剪切带的扩展，从而解决 Fe 基非晶合金材料的室温脆性问题。其中不同元素组合的特殊晶体相和非晶相之间的化学反应、力学作用、界面结合机制等方面，对 Fe 基非晶合金材料韧性和塑性的影响规律，还有很多值得进一步研究的内容。

### 4 Fe 基非晶复合涂层增塑增韧的辅助方法

除了通过调控激光工艺参数和材料成分的方法来提升 Fe 基非晶复合涂层的韧性和塑性，改善 Fe 基非晶复合涂层的室温脆性，也有学者在研究 Fe 基非晶涂层制备过程中通过辅助工艺方法来提升涂层的韧性和塑性。

马宇亮<sup>[35]</sup>研究了过渡层对激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层性能的影响，通过先在 Q235 钢基体上电镀一层 Ni-P 过渡层作为衬底，然后制备 Fe 基非晶合金涂层，研究结果表明随着 Ni-P 过渡层中 P 含量的增加，涂层中的非晶相含量增加，硬度稍有降低，室温脆性问题有明显的改善。也有学者在激光熔覆 Fe 基非晶涂层过程中，增加了电磁场的方法。卜丽明<sup>[36]</sup>研究了电磁场和 Ni-P 过渡层对激光熔覆 Fe 基非晶涂层的影响，研究结果表明电磁场使熔覆层组织更均匀，并且减弱了激光熔覆过程中熔体的流动，Ni-P 熔覆层熔体阻隔非晶粉末与基体熔体的混合，提高了激光熔覆层的非晶形成能力，两者共同作用有效改善了熔覆层的冲击韧性。同时表征了熔覆层在电磁场作用下的凝固特征、组织结构以及相应的机理，为后期电磁场在激光熔覆 Fe 基非晶涂层的工业应用提供了理论基础。袁吴焱等<sup>[37]</sup>提出了交变磁场辅助超高速激光熔覆 Fe 基非晶涂层的制备方法，研究结果表明，交变磁场可使熔覆层凝固过程中树枝晶难以长大，或被折断、

击碎, 从而提升熔覆层非晶相含量, 并细化晶粒, 抑制熔覆层的裂纹、气孔等缺陷, 有效改善熔覆层的室温脆性问题。姜凤春等<sup>[38]</sup>提出了一种超声冲击微锻造技术辅助超高速激光熔覆制备 Fe 基非晶涂层的方法, 超声冲击微锻造技术可以控制和改善非晶涂层的凝固过程, 超声能场能在熔池中产生空化现象, 降低微区熔体的瞬时温度, 提高凝固速率, 提高非晶相比例, 同时优化熔覆层的应力状态, 消除缺陷, 明显改善 Fe 基非晶涂层的脆性断裂问题。王天聪等<sup>[39]</sup>研究了不同含量镀镍碳纳米管对激光熔覆 Fe 基非晶涂层组织和力学性能的影响, 研究表明, 随着镀镍碳纳米管质量分数(0~1%)的增加, 涂层非晶区的硬度下降了 9%, 断裂韧度提高了 33.4%。

因此, 合适的辅助工艺方法可以有效提高激光熔覆 Fe 基非晶复合涂层的韧性和塑性, 进而帮助解决涂层的室温脆性问题。

## 5 结 语

激光熔覆制备 Fe 基非晶合金涂层, 结合了激光熔覆技术易智能化集成、绿色环保、涂层高结合强度的特点以及 Fe 基非晶涂层低成本、高耐磨耐腐蚀性能的特点, 能极大提高恶劣环境下服役装备表面的防护能力, 值得深入研究和推广, 但还存在塑韧性不足、室温脆性等问题。

本文从激光熔覆工艺、材料成分设计和辅助工艺方法 3 个角度讨论了提升激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层塑性和韧性的研究进展: 通过优化激光熔覆的工艺参数(激光功率、扫描速率、激光重熔等)使涂层具有非晶相和晶体相的适宜比例, 晶粒尺寸纳米化、双相界面有利于抑制裂纹扩展, 可有效提升涂层的韧性和塑性; 基于材料成分设计, 通过合成特殊结构晶体相的方法, 来抑制非晶合金剪切带的扩展, 可有效提升涂层的韧性和塑性; 利用电磁场、超声波、过渡层等辅助工艺对涂层制备过程的作用, 可调控涂层中非晶相和晶相比例, 降低稀释率, 细化晶粒, 改善涂层应力状态, 消除涂层的微孔、微裂纹等缺陷, 能有效提升涂层的韧性和塑性。

然而, 总体来说, 目前激光熔覆 Fe 基非晶合金复合涂层的塑性和韧性提升程度, 还不足以支撑其大规模工程应用, 以下几个方面还需进一步研究。

(1) 激光熔覆 Fe 基非晶复合涂层多种组织精细化调控。通过优化组元成分和调整工艺, 精确调控材料的晶化程度及分布, 并让晶相结构朝着纳米化或者亚微米化方向发展, 得到超细的强化相和韧性相均匀分布的涂层组织。

(2) 进一步加强原位生成韧性相、添加纳米颗粒韧

性相、添加金属陶瓷颗粒等第二相基于位错强化理论的研究, 探索双相增塑增韧作用机制。通过理论指导, 制备出具备高密度位错缠结纳米析出相的均匀 Fe 基非晶组织。

(3) 激光熔覆制备 Fe 基非晶合金涂层的过程涉及相变热力学、动力学、相界面理论等许多复杂的过程。对于多场耦合的复杂过程, 可进一步通过先进信息化和数字化技术监测多场耦合过程的数据。通过数据分析激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层制备过程中的双相内在形成和作用机制, 并能对 Fe 基非晶合金材料塑性和韧性的性能预测开展深入、系统的研究。

## 参考文献 References

- [1] KOGA G Y, TRAVESSA D, ZEPON G, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 884: 161090.
- [2] XIAO M Y, GAO H B, SUN L B, *et al.* Materials Letters[J], 2021, 297: 130002.
- [3] 苏铭滨, 何波, 倪黎, 等. 中国材料进展[J], 2025, 44(7): 629-635.  
SU M B, HE B, NI L, *et al.* Materials China[J], 2025, 44(7): 629-635.
- [4] KONG W C, LI K M, HU J. International Journal of Hydrogen Energy [J], 2022, 47(10): 6911-6923.
- [5] ZHANG H R, WANG S L, LI H X, *et al.* Coatings[J], 2022, 12(2): 176-176.
- [6] 田霖, 李春燕, 翟建树, 等. 稀有金属[J], 2021, 45(8): 998-1009.  
TIAN L, LI C Y, ZHAI J S, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals [J], 2021, 45(8): 998-1009.
- [7] 靳磊, 周海滨, 黄早早, 等. 稀有金属[J], 2019, 43(12): 1316-1324.  
JIN L, ZHOU H B, HUANG Z Z, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals [J], 2019, 43(12): 1316-1324.
- [8] 陈娜, 张盈祺, 姚可夫. 物理学报[J], 2017, 66(17): 202-211.  
CHEN N, ZHANG Y Q, YAO K F. Acta Physica Sinica[J], 2017, 66(17): 202-211.
- [9] MEGHWAL A, PINCHES S, KING H J, *et al.* Materialia[J], 2022, 25: 101549.
- [10] ABROSIMOVA G E, ARONIN A S. Crystallography Reports [J], 2020, 65(4): 573-576.
- [11] GLEZER A M, BLINOVA E N, PERMYAKOVA I E, *et al.* Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics [J], 2015, 79(9): 1141-1145.
- [12] LIU X Q, WU Y S, QIU Z G, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2022, 302: 117465.
- [13] SHANG X C, ZHANG C Z, XV T, *et al.* Materials Chemistry and Physics[J], 2021, 263: 124407.
- [14] LEI Q, WU Y P, SHENG H, *et al.* Surface & Coatings Technology

- [J], 2019, 366: 296-302.
- [15] SOUZA C A C, RIBEIRO D V, KIMINAMI C S. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2016, 442: 56-66.
- [16] WANG C Y, ZHOU J Z, ZHANG T, *et al.* *Optics and Laser Technology*[J], 2022, 149: 107843.
- [17] CUI C, WU M P, HE R, *et al.* *Optics and Laser Technology*[J], 2022, 149: 107885.
- [18] BASU A, SAMANT A N, HARIMKAR S P, *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2008, 202(12): 2623-2631.
- [19] ZHU Q J, WANG X H, QU S Y, *et al.* *Surface Engineering*[J], 2009, 25(3): 201-205.
- [20] ZHU Q J, QU S Y, WANG X H, *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2007, 253(17): 7060-7064.
- [21] ZHU Y Y, LI Z G, HUANG J, *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2012, 261: 896-901.
- [22] ZHANG P L, YAN H, YAO C W, *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2011, 206(6): 1229-1236.
- [23] ZHU Y Y, LI Z G, LI R F, *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 235: 699-705.
- [24] 张培磊, 闫华, 徐培全, 等. *中国有色金属学报*[J], 2011, 21(11): 2846-2851.  
ZHANG P L, YAN H, XU P Q, *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J], 2011, 21(11): 2846-2851.
- [25] 王彦芳, 李豪, 孙旭, 等. *中国激光*[J], 2018, 45(3): 222-227.  
WANG Y F, LI H, SUN X, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2018, 45(3): 222-227.
- [26] 鲁青龙, 王彦芳, 栗荔, 等. *中国激光*[J], 2013, 40(2): 116-121.  
LU Q L, WANG Y F, LI L, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2013, 40(2): 116-121.
- [27] 王彦芳, 栗荔, 鲁青龙, 等. *中国激光*[J], 2011, 38(6): 177-180.  
WANG Y F, LI L, LU Q L, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*[J], 2011, 38(6): 177-180.
- [28] MOJAVER R, MOJTAHEDI F, SHAHVERDI H R, *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2013, 264(1): 176-183.
- [29] INOUE A. *Engineering*[J], 2015, 1(2): 185-191.
- [30] HAYS C C, KIM C P, JOHNSON W L. *Physical Review Letters*[J], 2000, 84(13): 2901-2904.
- [31] SHEN B L, MEN H, INOUE A. *Applied Physics Letters*[J], 2006, 89(10): 1063.
- [32] MAKINO A, XUE L, YUBUTA K, *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2009, 60(5): 277-280.
- [33] GUO S F, LIU L, LI N, *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2010, 62(6): 329-332.
- [34] POON S J, SHIFLET G J, GU X J. *Amorphous Steel Composites with Enhanced Strength, Elastic Properties and Ductilities: US20090025834A1*[P]. 2009-01-29.
- [35] 马宇亮. 过渡层对激光熔覆 Fe 基非晶涂层微观结构及性能的影响[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
MA Y L. *Effect of Transition Layer on Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Fe-Based Metallic Glass Coating*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [36] 卜丽明. 磁场和过渡层作用下激光熔覆 Fe 基非晶涂层的结构及性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
BU L M. *Structure and Properties of Laser Cladding Fe-Based Amorphous Coating Under the Action of Magnetic Field and the Transition Layer*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [37] 袁吴焱, 武艳美, 肖猛, 等. 交变磁场辅助超高速激光熔覆非晶涂层的制备方法及装置: CN116288325A[P]. 2023-06-23.  
YUAN W Y, WU Y M, XIAO M, *et al.* *Preparation Method and Device of Ultra High Speed Laser Cladding Amorphous Coatings Assisted by Alternating Magnetic Field: CN116288325A*[P]. 2023-06-23.
- [38] 姜风春, 肖明颖, 高华兵, 等. 一种超声冲击辅助超高速激光熔覆制备非晶涂层的方法: CN111286733A[P]. 2020-06-16.  
JIANG F C, XIAO M Y, GAO H B, *et al.* *A Method of Ultrasonic Shock Assisted Ultra High Speed Laser Cladding for Preparation of Amorphous Coatings: CN111286733A*[P]. 2020-06-16.
- [39] 王天聪, 朱彦彦, 姚成武, 等. *机械工程材料*[J], 2020, 44(5): 54-59+65.  
WANG T C, ZHU Y Y, YAO C W, *et al.* *Materials for Mechanical Engineering*[J], 2020, 44(5): 54-59+65.