

激光熔覆粉末研究综述*

高世龙,朱孟浩,时 婧

(中国海洋大学 材料科学与工程学院,山东 青岛 266100)

摘要: 激光熔覆作为一种新兴的表面涂层改性技术,在制备表面强化涂层和材料改性方面发挥着至关重要的作用。熔覆粉末材料是决定熔覆层性能的关键因素之一,已成为激光熔覆技术研究的焦点。首先介绍了激光熔覆技术的核心原理,然后详细阐述了金属粉末、陶瓷粉末和复合粉末等熔覆材料的特点及研究进展,最后对激光熔覆粉末材料的未来发展方向进行了展望。

关键词: 激光熔覆;表面强化;材料改性;熔覆层;粉末材料

中图分类号: TG665

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2025.03.007

0 引言

随着现代科学技术的迅速发展,对材料性能的要求日益提高。材料的表面性能直接影响着产品的使用性能和寿命。表面改性处理作为一种广泛应用的技术,旨在提升材料的表面性能,进而有效延长其使用寿命。在传统的表面处理工艺中,如热喷涂,常常存在涂层与基体之间的结合强度不高、成分不均匀等问题,制约了其在一些高要求领域的应用。而激光熔覆作为一种先进的表面处理技术,通过高能激光束将粉末材料瞬间熔化,并在极短的时间内与基体融合,形成坚固的覆盖层,可以有效克服这些问题,提高样品表面性能和使用寿命,因此具有广泛的应用前景^[1]。激光熔覆层的性能受到多种因素的影响,其中包括粉末材料的选择与设计、熔覆过程的参数优化、覆盖层的微观结构与性能控制等方面。如何选择合适的粉末材料,以及在激光熔覆过程中实现覆盖层的均匀性、致密性和结合强度,是当前研究中亟待解决的核心问题。文章综述了不同种类熔覆材料的特性及其研究进展,通过对金属粉末、陶瓷粉末以及复合粉末等熔覆材料的详细探讨,可以进一步推动激光熔覆粉末材料技术的发展,为工业生产提供更高效、更可靠的表面处理解决方案。

1 激光熔覆技术

激光熔覆是一种先进的表面改性技术,通过高能激光束将熔覆材料熔化并沉积在基材表面,形成与基材冶金结合的涂层。这种技术可显著改善基材表面的耐磨性、耐腐蚀性、抗氧化性和其他性能。其工作原理示意如图1所示。

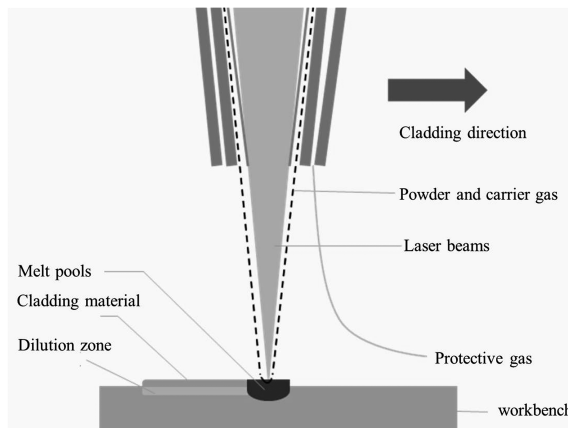


图1 激光熔覆原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of laser cladding

与其他表面涂层改性技术相比,激光熔覆技术具有诸多优点,包括热影响区小、污染小、稀释率低、畸变小、快速冷却凝固、适应范围广泛、与基体冶金结合良好、操作灵活、成本较低等^[2]。目前,激光熔覆技术广泛应用于航空航天、汽车制造、石油化工、冶金机械、船舶制造等领域,用于修复和强化关键部件的表面,延长其使用寿命,提高设备的可靠性和性能。随着材料科学、激光技术和控制技术的发展,激光熔覆技术将在更广泛的领域获得应用。总之,激光熔覆技术作为一种先进的表面工程手段,凭借其独特的优势和广阔的应用前景,正日益受到工业界和学术界的重视。

激光熔覆的送粉方法主要包括预置粉末法和同步送粉法。预置粉末法是指通过粘附剂、电镀或者喷涂等方法将粉末预置在基材表面,然后利用激光辐射将其加热融化,形成熔覆涂层。而同步送粉法则是利用

* 基金项目:山东省自然科学基金(ZR2022ME131)

收到初稿日期:2024-07-11

收到修改稿日期:2024-12-10

通讯作者:时 婧, E-mail: shijing@ouc.edu.cn

作者简介:高世龙 (2000—),男,在读硕士,师承时婧副教授,从事激光熔覆的研究。

气载式送粉器将粉末直接连续送入激光熔化池,使其在熔化凝固过程中与基材结合。

激光熔覆的工艺参数主要包括激光功率、送粉方式及速率、扫描速度以及光斑形状。其中,激光功率影响粉末的熔化程度,若功率过低,会导致熔覆不完全;而过高,则可能造成过烧和不均匀熔化。送粉速率影响粉末对激光能量的吸收,速率过低会导致能量不足;过高则会造成堆积。扫描速度则决定了激光束在粉末表面停留的时间,影响熔覆层的形成和性能。此外,不同的光斑形状会导致激光能量分布不同,进而影响熔覆层的质量和性能。

2 熔覆层粉末体系

熔覆材料是影响熔覆层性能的关键因素之一,自激光熔覆技术问世以来,熔覆材料的探索与研究便成为该领域的重要关注点。熔覆材料可分为粉末状材料、膏状材料、丝状材料和棒状材料等。其中,熔覆粉末通常与同步送粉法配合使用,是应用最为广泛的熔覆材料。目前,常见的熔覆粉末大致分为金属粉末、陶瓷粉末以及复合材料粉末。金属粉末包括铁基、镍基、钴基和铝基等多种类型,广泛用于提高工件的耐磨性、耐腐蚀性和抗氧化性。陶瓷粉末,如氧化铝、氧化锆和碳化硅等,主要用于增强熔覆层的硬度和耐高温性能。复合材料粉末则结合了金属和陶瓷的优点,能够同时

提供优异的力学性能和耐热、耐磨性能。近年来,随着材料科学的发展,新的熔覆粉末材料不断涌现。例如,纳米粉末材料因其粒径小、比表面积大,在熔覆层中能显著提高材料的致密性和力学性能。此外,高熵合金粉末和非晶合金粉末等新型材料也在激光熔覆中展现出良好的应用前景。这些新型材料的研究和应用,进一步拓宽了激光熔覆技术的应用范围,提升了其在工业中的实用价值。

2.1 金属粉末

2.1.1 自熔性合金粉末

自熔性合金粉末是一类具有自熔特性的金属粉末材料,其特点是在特定条件下能自发熔化并与基体形成良好的冶金结合。自熔性合金粉末主要由铁基、镍基、钴基等金属元素组成,同时含有一定量的具有自脱氧性和自造渣性的硅、硼、铬、钨等元素。这些合金粉末的成分设计旨在降低熔点、提高润湿性和流动性,增强熔覆层的耐磨性、耐腐蚀性和高温性能。表 1 为常用自熔性合金粉末的特点。由于含有降低熔点的元素(如硼、硅等),自溶性合金粉末在激光高温作用下能够快速熔化并形成液态熔池。这些液态熔池在冷却过程中与基材表面冶金结合,形成致密的熔覆层。自溶性合金粉末的自熔特性使其在熔覆过程中能更好地流动和润湿基材表面,进而确保熔覆层的均匀性和致密性^[3]。

表 1 自熔性合金粉末特点

Table 1 Characteristics of several self-fluxing alloy powders

Powder Material	Self-melting	merit	shortcoming	Fields of application	bibliography
Iron-based	Poor	Low price and good wear resistance	Poor oxidation resistance	Surface repair or reinforcement of parts	[4]
Nickel-based	Good	Good toughness, strong oxidation resistance, high corrosion resistance	Poor resistance to high temperatures	Wear protection of workpieces and repair of wear parts, high temperature and corrosive-environments, etc	[5]
Cobalt-based	Better	Good high temperature resistance, wear resistance, and corrosion resistance	The price is high	Aerospace, scroll engines, etc	[6]

(1) Fe 基

铁基自熔性合金粉末主要以铁(Fe)为基础,并添加一定量的合金元素,如铬(Cr)、镍(Ni)、钼(Mo)等。这些合金元素的添加主要是为了降低熔点、改善润湿性和流动性,提高熔覆层的性能。铁基自溶性粉末作为激光熔覆技术中的重要材料,具有价格低廉、耐磨性好、应用范围广等优点,在表面强化和修复领域具有广阔的应用前景,包括汽车制造、冶金机械、船舶制造和石油化工等^[7-8]。

Liu 等^[9]在 20 钢表面制备了铁基涂层,研究发现,随着 Fe 含量增加,熔覆层的晶粒逐渐变得粗大,硬度、高温耐蚀性以及耐磨性均有所下降。Xie 等^[10]在 25Cr2NiMoV 钢表面制备了铁基合金涂层,结果表明,

熔覆层与基体之间具有良好的冶金结合,且熔覆层的耐磨性显著优于基体。Li 等^[11]在 2Cr13 钢表面制备了高铝铬 Fe-B-C 熔覆层,研究显示,熔覆层致密且与基体间良好的冶金结合。由于生成了一系列高硬度的相,熔覆层显微硬度高达 620 HV,为基体硬度的 3.3 倍;此外,熔覆层还表现出优良的耐磨性,磨损率为 0.103。Xie 等^[12]在 EA4T 钢表面制备了 Fe314 合金涂层,研究表明,熔覆层主要由柱状晶和等轴晶组成,元素分布均匀。在界面处的熔覆层中,Cr 含量下降,而 Fe 含量相对较多。熔覆层的耐腐蚀性能明显优于基体。Li 等^[13]在 45 钢表面制备了硼含量不同的铁基合金涂层,研究发现,不同硼含量的铁基合金涂层主要由 α -Fe、 Cr_7C_3 、 Fe_2B 相组成,如图 2 的 XRD 图所示,

在熔覆过程中,粉末中的 Fe、Cr 元素与 B、C 元素反应生成了碳化物及硼化物。随着硼含量的增加,硼化物的组织形貌发生了显著变化:网状→簇状→长条状→板状,表明硼含量对硼化物形貌具有显著影响。由于硼化物硬质相的存在,铁基涂层的显微硬度和耐磨性

得到了显著提升。Wang 等^[14]在不锈钢表面制备了 FeCrBSi 涂层,研究显示,熔覆层组织均匀致密,与基体之间具有良好的冶金结合。熔覆层主要由马氏体、(Fe,Cr)₇C₃ 及 CrFeB 硬相组成,马氏体和硬相的存在显著增强了熔覆层的显微硬度。

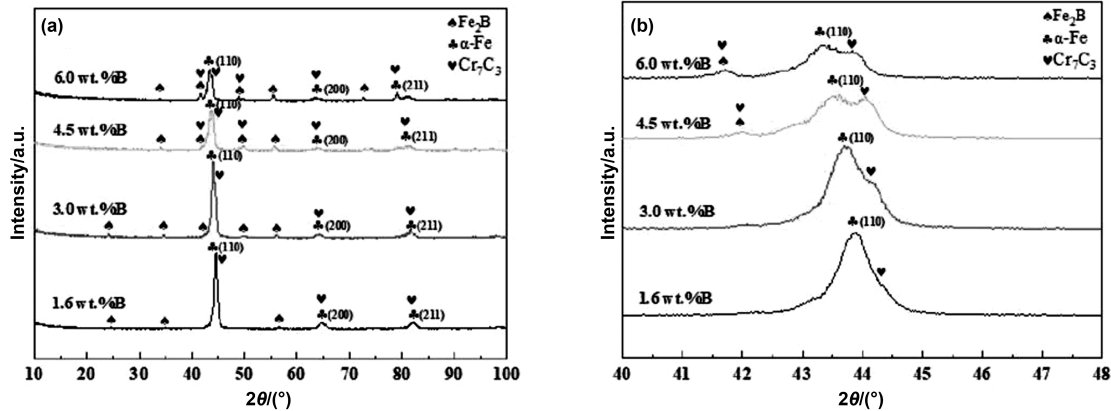


图 2 不同硼含量铁基合金涂层的 XRD 谱图^[13]
Fig.2 XRD patterns of the Fe-based alloy coatings with different boron contents

(2) Ni 基
Ni 基自溶性合金粉末凭借其优异的机械性能、耐腐蚀性和高温稳定性,广泛应用于表面工程领域,包括石油化工、航空航天、汽车工业和电力工业等。Ni 基自溶性合金粉末的主要成分是镍(Ni),并添加有硅(Si)、硼(B)、铬(Cr)、铁(Fe)、碳(C)等元素。这些元素在合金中发挥着重要作用。硅和硼能降低合金的熔

点,增强自溶性,有助于在熔覆过程中形成致密涂层;铬能提高合金的抗氧化和耐腐蚀性能;铁可以部分替代镍,降低成本的同时,在一定范围内不显著降低其性能;碳能形成碳化物,增强合金的硬度和耐磨性。随着科技的发展,Ni 基自溶性合金粉末在材料成分、制造工艺和应用领域方面不断取得进展^[15]。

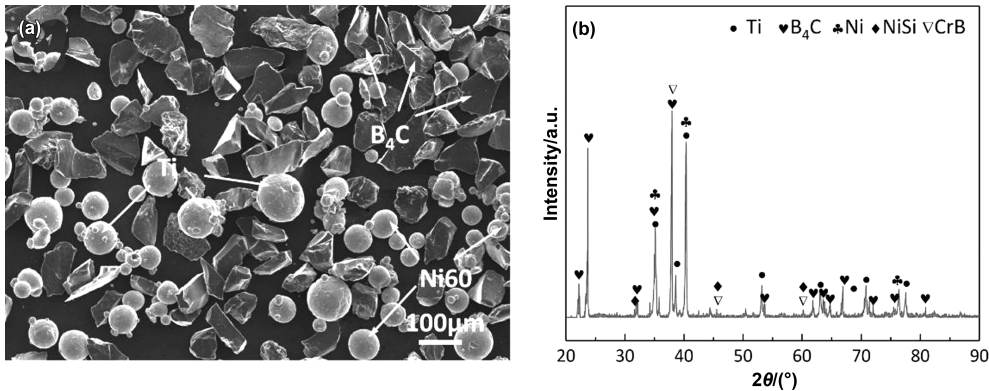


图 3 (a) Ni60-Ti-B₄C 粉末的 SEM 图像;(b) Ni60-Ti-B₄C 粉末的 XRD 图谱^[18]
Fig.3 (a) SEM image of Ni60-Ti-B₄C powder;(b) XRD pattern of Ni60-Ti-B₄C powder

Liu 等^[16]在 Cu 基体表面制备了 Ni1015 合金熔覆层,研究发现,熔覆层与基体间具有良好的冶金结合,组织致密均匀,无裂纹、气孔等缺陷。熔覆层的显微硬度为 Hv280,约为 Cu 基体(Hv85)的 3 倍。Lu 等^[17]在 Q235 钢上制备了 Ni60 涂层,研究发现,在最佳的工艺参数下,涂层的显微硬度为 499.4HV0.5,约为基体的 5 倍,同时涂层的耐磨性也显著提高。Meng 等^[18]在 Q235 钢表面制备了 Ni60-Ti-B₄C 硬质涂层,如图 3 所示,XRD 和 SEM 分析结果表明,熔覆层主要由尺寸不同的棒状 TiB₂ 和块状 TiC 组成,具有 TiB₂-TiC 共晶结构,并含有微量 FeNi、Ni₃Cr 和 NiSi 相。

经过工艺优化,涂层显微硬度最高为 1 278HV0.3,约为 Q235 钢基体的 7 倍,约是 Ni 熔覆层的 2.5 倍。Wang 等^[19]在 TC4 合金上制备了 Ni 熔覆层,研究发现,在适当的工艺参数下,熔覆层组织致密均匀,晶粒尺寸小,无裂纹缺陷,与基体间具有良好的冶金结合,由于 Cr₃C₂、TiC 的存在,Ni60 熔覆层的显微硬度显著提高。Deng 等^[20]在钼表面制备了成分不同的 Ni-Si 合金涂层,研究发现熔覆层与基体间具有良好的冶金结合,无裂纹、气孔等缺陷。熔覆层的显微结构如图 4 所示,枝晶是由小块相组成,而非单一相,这是由于合金的成分接近共晶点,在冷却凝固过程中析出共晶。

王家胜等^[21]在 27SiMn 钢基体上制备了 Ni60 基涂层,在最佳工艺参数下,熔覆层无裂纹、气孔等缺陷,与基体间存在良好的冶金结合;熔覆层自上而下依次由等轴晶、等轴晶和树枝晶、胞状晶和柱状晶组成,晶粒均匀,组织致密;熔覆层的韧性优良,显微硬度优于基体。

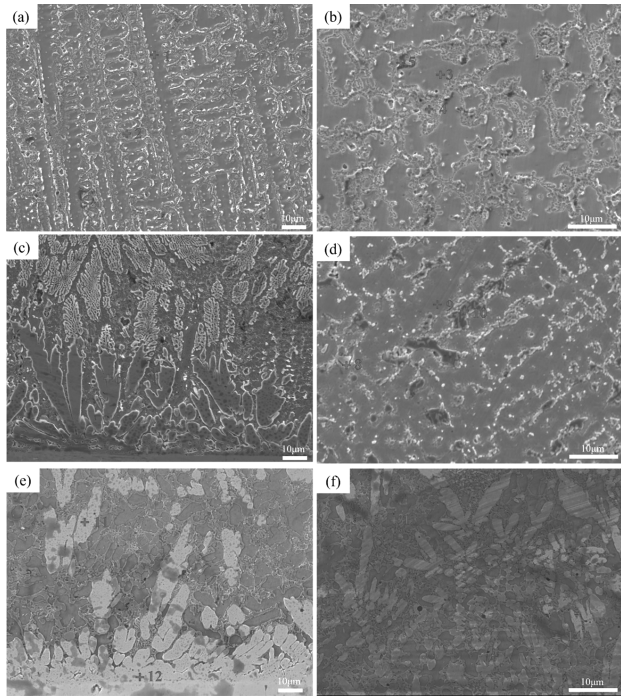


图 4 不同熔覆层的 SEM 显微结构:(a), (b) Ni95Si5; (c), (d) Ni90Si10; (e), (f) Ni85Si15^[20]

Fig.4 SEM microstructure of different laser cladding coating: (a), (b) Ni95Si5; (c), (d) Ni90Si10; (e), (f) Ni85Si15

(3)Co 基粉末

Co 基自溶性合金粉末的主要成分包括钴(Co)、铬(Cr)、硼(B)、硅(Si)等。这些元素的添加和比例可以调整合金的性能,其中钴作为主要基础金属,提供合金的基础性能,包括耐磨性、耐腐蚀等。铬能提高合金的耐腐蚀性和抗氧化性,增强合金的稳定性。硼和硅用于降低合金的熔点,提高合金的自溶性,促进合金涂层的形成。Co 基自溶性合金粉末的制备方法多种多样,包括化学合成、机械合成和真空热处理等。作为一种高硬度、耐腐蚀性和热稳定性优异的 Co 基自溶性合金粉末在激光熔覆涂层中发挥着关键作用,为提高涂层性能、拓展涂层应用领域提供了重要的技术支持^[22-23]。

Yang 等^[24]在 20CrMnTi 表面制备了钴基熔覆层,研究结果显示,熔覆层表面光滑平整无缺陷,组织结构致密,裂纹少。Zhang 等^[25]在 Ni35WC 合金中添加了 Co 基合金粉末制备了 Ni-Co-W 复合熔覆层,研究发现,添加 Co 基合金粉末的熔覆层中奥氏体晶粒细化,在其周围生成化合物 Cr_{23}C_6 或 $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 。Co 的加入,促使硬质相的生成,提高了熔覆层的硬度及耐磨性。Sun 等^[26]在 TC4 合金表面制备了 CoCrW 涂

层,研究表明:熔覆层主要由大晶粒和微量等轴晶组成,组织致密,无气孔、裂纹等缺陷,与基体间存在良好的冶金结合。与基体相比,制备 CoCrW 熔覆层后的耐腐蚀性得到了显著增强。Xiao 等^[27]在 30CrMoSiVA 钢表面制备了 Co06 涂层,研究发现,Co06 熔覆层显微组织由等轴晶、枝晶、柱状晶及平面晶组成,熔覆层的显微硬度约为基体的两倍,其显微硬度分布图如图 5 所示,涂层存在明显的热影响区,熔覆层与基体间具有良好的冶金结合,耐磨性优于基体。Liu 等^[28]在 30CrNiMo 钢表面沉积了钴基(Co06)合金粉末,熔覆层的显微结构如图 6 所示,熔覆层与基体间存在良好的冶金结合。熔覆层的显微硬度为 402HV0.3,具有优异的耐磨性,但在高温下具有不同的磨损机制。

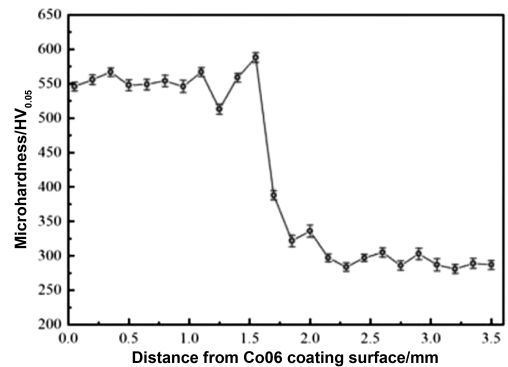


图 5 30CrMoSiVA 钢表面 Co06 涂层的显微硬度分布图^[27]

Fig.5 Microhardness distribution of Co06 coating on 30CrMoSiVA steel

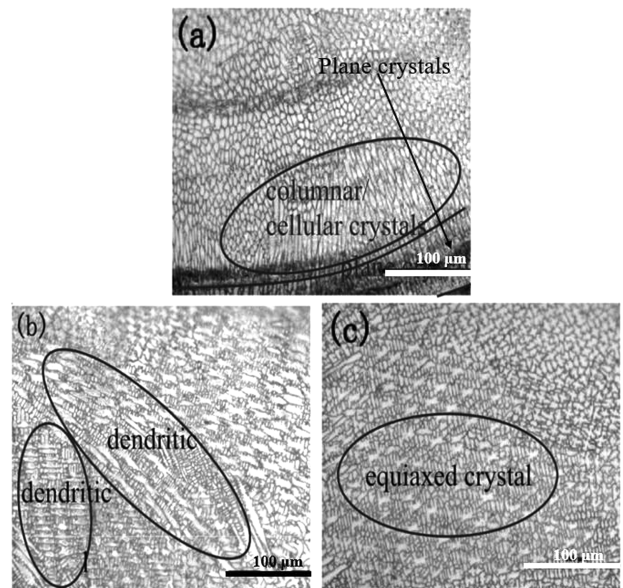


图 6 熔覆层的微观结构:(a)底部;(b)中部;(c)顶部^[28]

Fig.6 Microstructure of laser cladded coatings: (a) bottom; (b) middle; (c) top

2.1.2 高熵合金粉末

2004 年 Yeh 等^[29]首次提出高熵合金(high-entropy alloys, HEA)概念,高熵合金是由 5 种或更多元素

组成,并且每种元素的摩尔分数在 5%~35%之间的合金体系。这种新的合金设计理念通过增加合金的混合熵,形成了独特的微观结构和性能,吸引了大量的研究关注。高熵合金具有以下特点:高熵效应(热力学)、缓慢扩散效应(动力学)、晶格畸变严重(结构上)和“鸡尾酒效应(性能上)^[30]”(即反应位点的相互组合能够调和出极优化的位点)。高熵合金的显微结构通常为单相固溶体,包括面心立方(FCC)、体心立方(BCC)和

密排六方(HCP)结构。有时也会形成多相结构,如 FCC+BCC 或 BCC+HCP 等。凭借其独特的显微结构和性能特点,高熵合金具有优异的综合性能,如高强度、高硬度、良好的延展性和韧性,较好的耐腐蚀性能和高温稳定性等,在航空航天、能源领域、生物医学和耐磨材料等多个领域具有广泛的应用前景^[31]。制备高熵合金熔覆层常用元素有 Fe、Ni、Al、Si、C、B 等,常用元素的物理性能和化学性能见表 2。

表 2 常用元素物理、化学性能表^[32]

Table 2 Table of physical and chemical properties of commonly used elements

element	symbol	Atomic number	Atomic radius/nm	electronegativity	Valence electron concentration
iron	Fe	26	0.1241	1.83	8
nickel	Ni	28	0.1246	1.91	10
aluminium	Al	13	0.1432	1.61	3
silicon	Si	14	0.1153	1.90	4
boron	B	5	0.0820	2.04	3
carbon	C	6	0.0773	2.55	4

Vyas 等^[33]在奥氏体不锈钢 AISI 316 上制备了 AlFeCuCrCoNi-WC₁₀ 高熵合金熔覆层,研究发现,该熔覆层由 BCC、FCC、富 W 相组成,熔覆层中元素分布均匀,主要由等轴晶和柱状晶构成;高熵合金熔覆层显微硬度约为基体的 4.5 倍。Li 等^[34]在 Q235 钢表面制得了 AlCrFeNiMo_{0.5}Si_x ($x=0,0.5,1.0,1.5,2.0$) 高熵合金熔覆层,研究表明,高熵合金熔覆层由 BCC 结构纳米析出相和 B2 结构基体组成,与基体之间有良好的冶金结合。随着 Si 的加入,熔覆层的显微硬度和耐磨性得到提升。Li 等^[35]制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金,研究发现,样品在低温下的性能、硬度、耐磨性均提高。Xu 等^[36]在 316L 不锈钢上制备了 CoCrFeNiCu (SiC)_x ($x=0,5\%,10\%,15\%$ (质量分数))高熵合金熔覆层,研究发现,该熔覆层为 FCC 结构,由于晶界强化,熔覆层的性能得到了提升;随 SiC 含量的增加,CoCrFeNiCu(SiC)_x 熔覆层的耐蚀性和显微硬度均有所提升。Jin 等^[37]制备了 FeNiCoAlCu 高熵合金熔覆层,研究表明,熔覆层由 FCC 及 BCC 固溶体相组成,具有均匀的枝晶组织。高温 XRD 和 DSC 结果表明(如图 7 和 8 所示),该熔覆层具有优良的热稳定性。Liu 等^[38]在 40CrNiMoA 钢上制备了 CoCrFeNiTi 高熵合金熔覆层,研究发现,熔覆层与基体间存在良好的冶金结合,具有典型的枝晶组织,由固溶相、V 相及 Co₂Ti 相组成。由于第二相强化作用,高熵合金熔覆层的显微硬度显著提高。熔覆层的磨损率为 0.84~107 mm³/(N·m),由于 Ti 的存在,耐磨性优于基体,但耐蚀性有所降低。

基于高熵合金的概念,近年来还发展出了中熵合金 (medium-entropy alloys, MEA) 这一分支,中熵合金通常由 3~4 种主要元素组成,每种元素的摩尔分数在 5%~35%之间。与高熵合金相比,中熵合金具有较低的混合熵,但仍能通过适当的元素组合和微观结

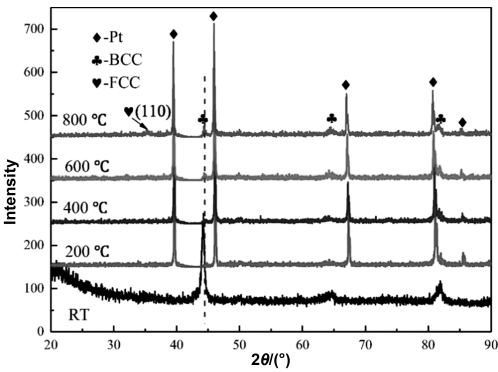


图 7 不同温度下激光熔覆 FeNiCoAlCu 高熵合金涂层的 HT-XRD 图谱^[37]

Fig.7 HT-XRD patterns of laser-cladded FeNiCoAl-Cu high-entropy alloy coating at different temperatures

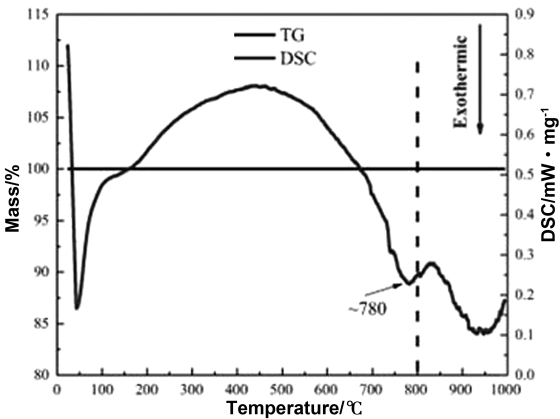


图 8 激光熔覆 FeNiCoAlCu 高熵合金涂层的 TG 和 DSC 曲线^[37]

Fig.8 TG and DSC curves of laser-cladded FeNiCoAl-Cu high-entropy alloy coating

构调控实现优异的综合性能^[39],且在满足性能的前提下价格更低,熔覆层结构更为均匀,易于工业化应用,因此在激光熔覆领域中发展迅速^[40]。

Chen 等^[41]在钢材上制备了 Fe₆AlCoCrNi 中熵合金熔覆层,研究发现,熔覆层由 FCC 相和 BCC 相组成,由于氧化皮的产生,熔覆层的耐磨性显著提升,远优于基体。Feng 等^[42]制备了 CrCoNi 中熵合金涂层,并与 SS304 进行对比,结果表明熔覆层组织致密,与基体之间具有良好的冶金结合,没有明显的缺陷。在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中, CrCoNi 熔覆层比 SS304 更易腐蚀,但其钝化膜稳定性良好, CrCoNi 熔覆层的钝化膜主要由 Cr(OH)₃ 组成。在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中, CrCoNi 涂层的耐腐蚀性优于 SS304。Yuan 等^[43]在 Q235 钢表面制备了无 Co 的 FeCrNi-Si_{0.4} 中熵合金涂层,研究发现,熔覆层无气孔、裂纹等缺陷,主要由 FCC 相及少量 HCP 相组成。熔覆层的力学性能和耐腐蚀性显著提高,显微硬度为 (345 ± 1.8)HV,约为 Q235 钢的 2 倍。从图 9 中可以看出,熔覆层硬度呈现缓慢下降的趋势,而不是突然下降,说明涂层与基体的力学性能匹配良好,形成了致密的界面结合。

2.2 陶瓷粉末

用于激光熔覆的陶瓷粉末主要包括氧化物、碳化物、氮化物及硼化物等,其中陶瓷粉末主要以氧化物陶瓷粉末 Al₂O₃、ZrO₂ 为主,氧化物陶瓷粉末用途极为广泛,可作为结构材料,功能材料,用于电子、信息、激光等领域。非氧化物陶瓷粉末一般熔点更高,制备相对更难,但是硬度及耐磨性等要更好一些,非氧化物陶瓷粉末常用做高温结构材料、耐火材料,在航空航天等领域应用广泛。与金属粉末相比,陶瓷粉末具有熔点高、硬度高、优异的耐磨耐蚀、耐高温以及高温抗氧化等优点,常用于制备高温耐磨耐蚀涂层。陶瓷粉末可被直接熔覆在基体表面,也可以与金属粉末混合制备复合涂层。陶瓷粉末激光熔覆层通常表现出致密的显微结构,主要由基体相和陶瓷相组成。陶瓷颗粒均匀

分布在基体中,可以大大提高熔覆层的整体性能。而激光熔覆过程中的快速冷却,有助于细化晶粒,增强材料的力学性能。基体与陶瓷相之间存在良好的冶金结合,从而形成高硬度和高耐磨性的复合结构。

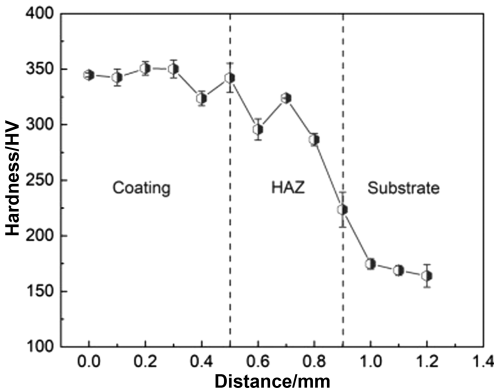


图 9 CrFeNiSi₄ MEA 涂层的硬度分布图^[43]
Fig.9 Hardness distribution of CrFeNiSi₄ MEA coating

2.2.1 氧化物陶瓷粉末

Zhang 等^[48]在 Ti6Al4V 合金表面制备了掺杂 MnO₂ 的 Al₂O₃ 涂层,其原理如图 10 所示,研究发现,当 MnO₂ 加入量为 1.0% (质量分数)时,熔覆层组织致密均匀,并伴有中间层。由于喷砂处理,熔覆层与基体之间具有良好的附着力,基体的显微硬度及弹性模量得到了显著提升。该研究表明,可以通过加入微量 MnO₂ 来增加吸收率,从而降低激光能耗。Yue^[49]在铝合金表面通过铝热反应制备了 Al₂O₃ 涂层,研究发现,熔覆层与基体间存在良好的冶金结合,熔覆层主要由 α-Al₂O₃、γ-Al₂O₃、Al 以及铝热反应的各类产物组成熔覆层中原位生成的 Al₂O₃ 颗粒组成,细化了晶粒,抑制了裂纹的产生,提高了熔覆层的显微硬度及韧性。

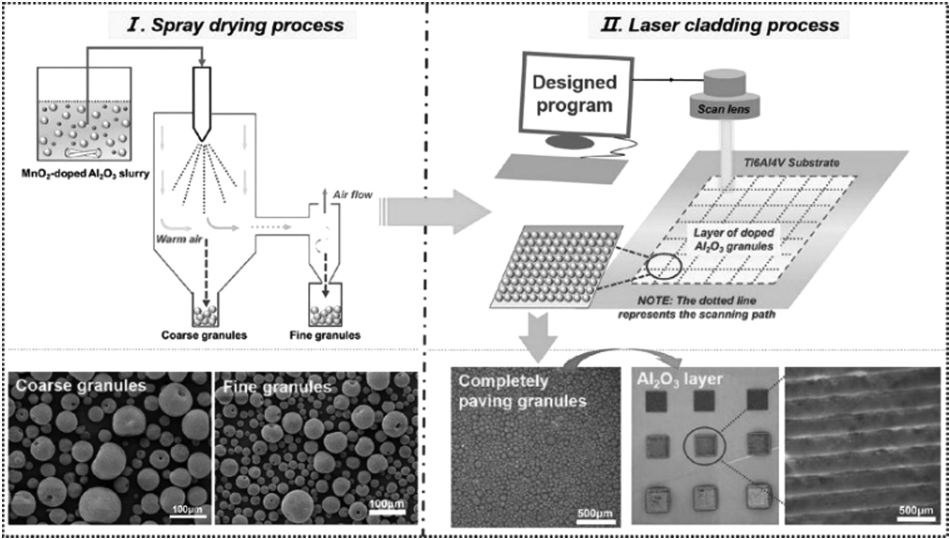


图 10 在 Ti6Al4V 合金上制备 MnO₂ 掺杂 Al₂O₃ 涂层的工艺示意图^[48]
Fig.10 Schematic illustration of the synthesis process for MnO₂-doped Al₂O₃ layer on the Ti6Al4V alloy

2.2.2 非氧化物陶瓷粉末

Fazliana 等^[50]在 H13 工具钢表面熔覆了 WC 粉末颗粒,旨在阻止晶界移动并保持晶粒细化,研究发现,加入 WC 颗粒后,H13 钢表面显微硬度高达 2 389 HV。在高温下,仍然保持完整细小的晶粒,从而保持了表面性能。根据疲劳试验得出,WC 颗粒出现在树枝晶结构中,且在 600 ℃以上的温度下具有热稳定性。Chen 等^[51]在 Ti6Al4V 合金表面制备了 TiC 陶瓷涂层,如图 11(a)所示,熔覆层与基体间存在良好的冶金结合,熔覆层组织主要由灰白色树突和灰色针状结构为主(图 11(a)-(c)),并存在少量颗粒(图 11(a)和(d))。纳米 TiC 粉体在处理过程中发生重熔重结晶,促进了熔覆层中 TiC 结晶。虽然 TiC 被重结晶,但仍被熔覆层隔离。重熔基体表面稀释了 TiC 陶瓷,而 TiC 的沉淀诱导了 α_2 -Ti₃Al 的生成,如图 11(f) - (k) 所示。随着 TiC 陶瓷熔覆层的加强,基体的显微硬度和断裂韧性得到改善,对生物相容性没有影响。

2.3 复合粉末

复合粉末作为一种新型熔覆材料体系,显著解决了陶瓷涂层与基体之间由于物理化学性能差异导致的严重开裂问题。其制备原理是将高硬度的硬质材料均匀混入金属或合金粉末中^[52]。通过激光熔覆技术在

基体材料上形成复合涂层。这种涂层不仅保持了基体材料的性能优点,还通过硬质增强相的引入,显著提升了基体金属材料的使用性能。而金属或合金粉末则充当黏结相和过渡层,促进了硬质材料与金属基体的良好结合,确保了熔覆层的良好成形。其中,硬质材料主要由高熔点和高硬度的陶瓷材料构成,如碳化物、氮化物、氧化物等,这些材料赋予了熔覆层出色的耐磨性和耐腐蚀性。而金属合金粉末,主要包括 Fe 基、Ni 基和 Co 基 3 种自熔性合金粉末,不仅增强了熔覆层的强度和韧性,还优化了熔覆层与基体之间的过渡,确保了整体性能的稳定。在复合材料中,金属基复合材料具有高强度、高模量、良好的耐磨性及抗氧化性、热膨胀系数低等优点,在航空航天、汽车工业等领域具有广泛的应用前景。而陶瓷增强金属基复合材料结合了陶瓷颗粒的高硬度、高耐磨性于金属基体的韧性,形成了耐磨性良好、抗冲击性优越的复合材料,适应于需要高耐磨性和抗冲击性能的场所。复合粉末在激光熔覆中的应用,为解决陶瓷涂层与基体之间的属性差异问题提供了一种有效途径。这一技术不仅提升了熔覆层的机械性能和耐腐蚀性能,还确保了涂层与基体的良好结合,具有广阔的应用前景和发展潜力。表 3 为常见陶瓷材料。

表 3 常见陶瓷材料
Table 3 Common ceramic materials

Ceramic materials	characteristic	use	bibliography
WC	High melting point, high hardness, good wettability	It is often used as a reinforcing phase for Ni-based composite coatings	[44]
TiB ₂	Low coefficient of friction, high hardness and good oxidation resistance	It is the best material for wear-resistant parts, high-temperature resistant and functional devices	[45]
TiC	High hardness, high modulus, high temperature stability	Metal surface strengthening, preparation of aerospace parts	[46]
SiC	The coefficient of thermal expansion is small, and the wear resistance and corrosion resistance are excellent	Aerospace and other industrial fields, high-temperature corrosion-resistant components, etc	[47]

2.3.1 金属基复合材料粉末

Kumar 等^[53]在钛铁矿(Fe-TiO₃)、CeO₂、La₂O₃、立方氮化硼(cBN)和 Ti6Al4V 混合制备的复合熔覆层中发现,随着铈和镧含量的增加,晶粒细化,且组织结构独特,熔覆层的耐磨性和硬度显著提升,显微硬度约为基体硬度的 5 倍,熔覆层存在少量裂纹。Liu^[54]在 316L 不锈钢表面上制得了 CoCrNi-*x* TiC-*x* TiB₂ (*x* = 0,5%,15%(质量分数))复合熔覆层,结果表明,熔覆层与基体间具有良好的冶金结合,气孔、裂纹等缺陷不明显;由于细晶强化和弥散强化作用,复合熔覆层的显微硬度和耐磨性得到显著提升。Yan 等^[55]在 PH13-8Mo 钢表面制备了 NiCrBSi-WC 复合熔覆层,研究发现,熔覆层中存在较多二次碳化物及 γ -(Ni,Fe)固溶体,熔覆层的平均显微硬度为 1 008 HV_{0.2},表现出优良的摩擦学性能。Wei 等^[56]探究了 WC 含量对铁基

熔覆层的影响,发现随着 WC 含量的增加,涂层的显微硬度逐渐升高。当 WC 添加量为 16%时,涂层的显微硬度达到 826.2 HV,耐磨性也随之提升。Xu 等^[57]在 65Mn 表面制备了 Ni-WC 合金熔覆层,结果显示,熔覆层致密,无裂纹气孔等缺陷,与基体存在良好的冶金结合。熔覆层硬度显著提高,平均显微硬度约为 1 000HV(0.2),且具有较好的硬度梯度和高韧性,耐磨性显著提升。Jiang 等^[58]在 316L 不锈钢表面制备了 Ni60-WC_{*x*} (*x* = 0、2%、4%、6%)熔覆层,研究发现,添加 WC 粉末改变了 Ni 基熔覆层的组织,使其硬度显著提升。当 WC 比为 2%时,熔覆层为胞状晶,显微硬度达到最大值 822.8 HV,耐腐蚀性能最优。

2.3.2 陶瓷增强金属基复合材料粉末

Quan 等^[59]在 45 钢表面制备了原位 TiC 增强的 Co 基复合熔覆层,研究发现,随着(Ti+C)的含量增

加,等轴晶和棒状树突数量增加,晶粒更加细化,熔覆层的显微硬度逐渐提高。Riquelme 等^[60]在 AA6082 铝合金表面制备了 SiC 颗粒增强的铝合金陶瓷涂层,研究发现,磨损机制随着滑动距离的变化而变化,在前 200 m 的滑动距离内,由于熔覆层显微硬度较高,磨损率低于基体;而在较长的滑动距离下,未熔覆的 AA6082 铝合金的耐磨性优于熔覆的 AA6082,因为在 AA6082 表面生成了一层润滑氧化层。Raahgini 等^[61]在 304 不锈钢基体上制备了 VC 增强的 Inconel625

(In625)金属基复合涂层,如图 12(c)所示。未添加 VC 颗粒的 In625 熔覆层与基体间存在良好的冶金结合,表面几乎无缺陷。从图 12(a)-(b)中可以看出,该熔覆层具有良好的枝晶结构,并且在枝晶间区域具有二次相。研究表明,VC 在 In625 合金熔覆层中的含量与熔覆层硬度之间几乎呈线性关系,加入 VC 颗粒显著提高了熔覆层的显微硬度。然而,由于 In625 基体中存在未熔的 VC 颗粒发生细小碎裂,其耐磨性要低于未添加 VC 的 In625 熔覆层。

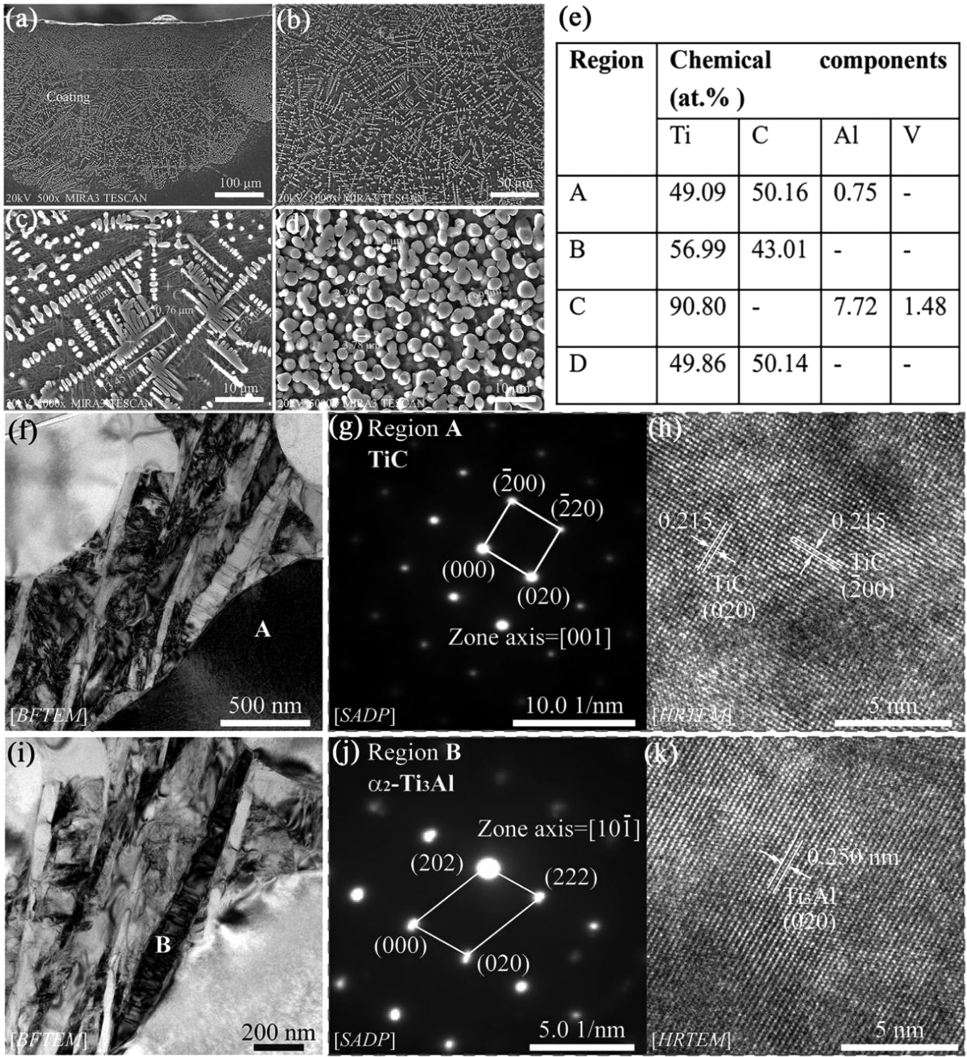


图 11 TiC 陶瓷熔覆层的微观结构 SEM 图及透射电镜 TEM 图:(a)横截面形貌;(b)TiC 枝晶的低倍率图像(c)高倍率图像;(d)TiC 颗粒的高倍率图像;(e)TiC 陶瓷涂层的 EDS 分析结果(A、B、C、D 为(b)-(d)中的选定区域);(f)TiC 相的 BFTEM 图像及其对应物;(g),(h)TiC 阶段的 SADP 和 HRTEM 图像;(i) α_2 - Ti_3Al 的 BFTEM 图像及其对应物;(j),(k) α_2 - Ti_3Al 阶段的 SADP 和 HRTEM 图像^[51]

Fig.11 SEM diagram of the microstructure of TiC ceramic cladding layer and TEM diagram of transmission electron microscope: (a) cross-sectional topography; (b) low-magnification image of TiC dendrites; (c) high-magnification images; (d) high-magnification image of TiC particles; (e) EDS analysis results of TiC ceramic coatings; (f) BFTEM image of the TiC phase and its counterpart; (g), (h) SADP and HRTEM images at the TiC stage; (i) BFTEM image of α_2 - Ti_3Al and its counterpart; (j), (k) SADP and HRTEM images at the α_2 - Ti_3Al stage

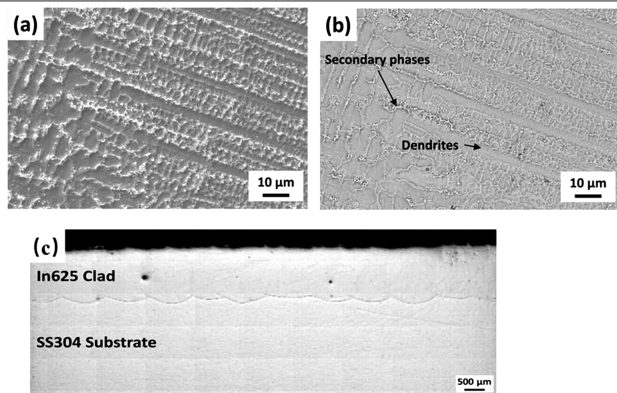


图12 In625 熔覆层枝晶组织:(a) SEM 图像 (b) BSE 图像;(c)In625 熔覆层的横截面^[61]

Fig. 12 The dendritic microstructure of the In625 clads: (a) SEM image; (b) BSE image; (c) cross-section of the In625 clad

综上所述,几种熔覆材料中,自熔性合金粉末因其具有自脱氧和造渣功能,可以显著提高材料的耐磨耐蚀等性能,特别是 Co 基粉末,具有良好的润湿性、耐蚀性等特点,在激光熔覆的研究和应用中较为广泛。高熵合金粉末所制备的熔覆层具有优异的硬度和耐高温氧化性能,其熔覆层组织结构通常为单一固溶体结构,如 FCC 或 BCC,混合熵效应高,能减缓元素的扩散与相分离,提高热稳定性。陶瓷粉末具有优异的耐磨耐蚀特性,制备的熔覆层高温耐磨耐蚀,但因其与基体金属的物理性质相差较大,在熔覆层可能出现裂纹、气孔等缺陷,未来的研究中可以考虑加入稀土元素粉末来减少气孔等缺陷。复合粉末结合了金属粉末的韧性及陶瓷粉末的硬度,制备出的熔覆层耐磨耐蚀性优异,该粉末是激光熔覆领域研究的热点之一。

除了上述几种熔覆材料粉末以外,塑料粉末和生物材料在激光熔覆领域也有广泛的应用前景。其中,塑料粉末常被用做基体或增强相,与金属或陶瓷粉末复合,制备出具有特定功能的复合材料涂层。塑料粉末的加入可以改善涂层的耐腐蚀性、耐磨性和自润滑性。研究发现,适量的塑料粉末可以有效降低涂层的摩擦系数,提高其耐磨性能。此外,塑料材料具有质量轻的特点,将其应用于激光熔覆,可以实现涂层的轻量化,特别适用于航空航天和汽车工业中对轻量化材料的需求。而生物材料在激光熔覆中的应用主要体现在生物医用涂层的制备和生物相容性材料的开发上。利用激光熔覆技术,可以将生物材料制备成具有特定孔隙结构和力学性能的组织工程支架。这些支架有助于细胞的黏附、生长和分化,促进组织的再生和修复。还可以在生物医用器械表面制备出含有药物的生物材料涂层,实现药物的可控释放,提高治疗效果。总的来说,塑料粉末和生物材料在激光熔覆领域的研究仍处于起步阶段,但已展现出巨大的应用潜力。

3 结 语

激光熔覆技术作为一种新型的表面改性技术已在众多领域得到广泛应用,随着研究的深入,熔覆层粉末材料也从自熔性粉末等逐渐变得多种多样。本文主要阐述了高熵合金及复合材料等作为新型高性能粉末材料,对材料性能的提升具有重要意义。同时,在工艺参数优化和性能设计方面,材料粒度等因素对熔覆层的影响等方面仍需要开展进一步的研究。此外,一些稀土元素如 Y、Ce 等能够细化晶粒,为熔覆层粉末材料领域注入了新的活力。

参考文献:

- [1] Tamanna N, Crouch R, Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 151-163.
- [2] Zhu L, Xue P, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [3] Hong L, Liu D J. A review of the research status of laser cladding[C]// Proceedings of the 2007 Academic Annual Meeting of Shanghai Laser Society. Shanghai: Shanghai Laser Society, 2007: 235-239 (in Chinese).
洪蕾,柳德金.激光熔覆研究现状综述[C]//上海市激光学会.上海市激光学会 2007 年学术年会论文集.[出版者不详],2007:235-239.
- [4] Li Y H, Tan C X, Li M Y, et al. Research progress of laser cladding iron-based alloy coatings[J]. Surface Technology, 2024, 53(6): 11-27 (in Chinese).
李垚焱,谭诚香,李梦瑶,等.激光熔覆铁基合金涂层的研究进展[J].表面技术, 2024, 53(6): 11-27.
- [5] Liu Y, Wang K, Fu H. Improvement of the high temperature wear resistance of laser cladding nickel-based coating: a review[J]. Metals, 2023, 13(5): 840.
- [6] Ding L, Hu S, Quan X, et al. Microstructure and high temperature tribological performance of Co-based laser cladded coatings reinforced with in-situ TiN-VC[J]. Vacuum, 2022, 198: 110894.
- [7] Zhu H M, Hu J P, Li B C, et al. Research progress on laser cladding stainless steel coatings on the surface of Fe-based materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 74-84(in Chinese).
朱红梅,胡际鹏,李柏春,等.铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展[J].表面技术, 2020, 49(3): 74-84.
- [8] Zhang M Q, Jiang W, Wang S Q. High-temperature wear performance of laser cladding Fe-based coating[J]. Material Protection, 2021, 54(6): 64-71 (in Chinese).
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.
- [9] Liu W, Li L, Mi G, et al. Effect of Fe content on microstructure and properties of laser cladding inconel 625 alloy[J]. Materials, 2022, 15(22): 8200.
- [10] Xie L, Wang Y. Microstructure and mechanical properties of Fe-based alloy coatings fabricated by laser cladding

- [J]. Materials Science, 2023, 29(4): 456-462.
- [11] Li J, Ju J, Chang W, et al. Investigation on the microstructure and wear behavior of laser-cladded high aluminum and chromium Fe-BC coating[J]. Materials, 2020, 13(11): 2443.
- [12] Xie Y, Huang B, Zhuang J, et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe314 alloy prepared by laser cladding on EA4T steel surface[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(11): 11584-11593.
- [13] Li Q, Zhang Y L, Zhang L, et al. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by lasercladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129342.
- [14] Wang Q, Chen F Q, Zhang L, et al. Microstructure evolution and high temperature corrosion behavior of FeCrBSi coatings prepared by laser cladding[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17233-17242.
- [15] Zhang J H, Sun R L. Study on porosity and crack sensitivity of Ni-based composite coatings [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 141-144(in Chinese).
张佳虹, 孙荣禄. 激光熔覆 Ni 基复合涂层气孔及裂纹敏感性的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 141-144.
- [16] Liu F, Liu C, Tao X, et al. Laser cladding of Ni-based alloy on copper substrate[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2006, 13(4): 329-332.
- [17] Lu P, Jia L, Zhang C, et al. Optimization on laser cladding parameters for preparing Ni60 coating along with its friction and wear properties[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107162.
- [18] Meng L, Hu M, Zhao H, et al. Microstructure and wear resistance of laser-clad Ni60-Ti-B4C coatings[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(7): 3119-3132.
- [19] Wang F, Li X, Peng J, et al. The microstructure and properties of Ni60 cladding layer by laser cladding on TC4 alloy surface[C]//Journal of Physics: Conference Series. UK: IOP Publishing, 2023, 2566(1): 012070.
- [20] Deng L, Huang C, Zhao Y, et al. Microstructure and anti-oxidation behavior of laser clad NiSi coating on molybdenum surface [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 120: 106570.
- [21] Wang J S, Shu L S, Gong J T, et al. Performance of Ni60 high hardness wear-resistant layer prepared by laser cladding on hydraulic support materials surface[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2024, 45(3): 166-174(in Chinese).
王家胜, 舒林森, 巩江涛, 等. 液压支架材料表面激光熔覆 Ni60 高硬耐磨涂层的性能[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(3): 166-174.
- [22] Jiang S S, Liang L S, Shu F Y. Optimization of laser cladding Co-based alloy cladding process on 45 steel surface [J]. Material Reports, 2020, 34 (S1): 488-451 (in Chinese).
蒋三生, 梁立帅, 舒凤远. 45 钢表面激光熔覆 Co 基合金覆层工艺优化[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 448-451.
- [23] Cui G, Han B, Zhang M K. Study on the process of laser cladding co-based alloy prepared on the surface of stainless steel[J]. Apply Lasers, 2015, 35(4): 397-401 (in Chinese).
崔 岗, 韩 彬, 张蒙科. 不锈钢表面激光熔覆 Co 基合金涂层工艺研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 397-401.
- [24] Yang Y, Jiang Z P, Li H Z. Effect of co-based alloy on properties of laser cladding layer [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. UK: IOP Publishing, 2017, 265(1): 012021.
- [25] Zhang L, Zhang D. Laser cladding of Ni-Co-W composite coating on stainless steel to enhance wear resistance[J]. Materials Science, 2022, 28(3): 280-286.
- [26] Sun Y B, Niu H J, Wang J Y, et al. Microstructure and corrosion property of prepared CoCrW coatings on the TC4 surface by laser cladding[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1687.
- [27] Xiao Y, Shen L, Zhao H, et al. Tribological properties of copper-matrix composites against laser-cladded Co06 coating on 30CrMoSiVA steel at elevated temperatures [J]. Tribology International, 2024, 192: 109333.
- [28] Liu Y, Wu Y, Ma Y, et al. High temperature wear performance of laser cladding Co06 coating on high-speed train brakedisc[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 761-766.
- [29] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high - entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.
- [30] Wang Y L, Gong S L, Tang M R, et al. Effect of laser cladding process on the microstructure and properties of high entropy alloys [J]. Journal of Welding Science, 2023, 44(8): 116-122, 136 (in Chinese).
王永生, 宫书林, 汤明日, 等. 激光熔覆工艺对高熵合金组织与性能影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 116-122, 136.
- [31] Geng Y, Konovalov S V, Chen X. Research status and application of the high-entropy and traditional alloys fabricated via the laser cladding[J]. Progress in Physics of Metals, 2020, 21(1): 26-45.
- [32] Sheng G U O, Liu C T. Phase stability in high entropy alloys: formation of solid-solution phase or amorphous phase[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2011, 21(6): 433-446.
- [33] Vyas A, Menghani J, Natu H. Metallurgical and mechanical properties of laser cladded alfecurconi-WC10 high entropy alloy coating[J]. International Journal of Engineering, 2020, 33(7): 1397-1402.
- [34] Li X, Liang H, Zhao Y, et al. Microstructure and wear resistance of AlCrFeNiMo0.5Si_x high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. China Foundry, 2022, 19(6): 473-480.
- [35] Li H G, Che P C, Yang X K, et al. Enhanced tensile properties and wear resistance of additively manufactured-CoCrFeMnNi high-entropy alloy at cryogenic temperature

- [J]. *Rare Metals*, 2022, 41(4): 1210-1216.
- [36] Xu L, Du H, Liu J, et al. Microstructure, mechanical, and electrochemical properties of SiC particle reinforced CoCrFeNiCu high-entropy alloy coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(4): 519.
- [37] Jin G, Cai Z, Guan Y, et al. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 445: 113-122.
- [38] Liu H, Gao W, Liu J, et al. Microstructure and properties of CoCrFeNiTi high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29: 7170-7178.
- [39] Choi J W, Kim J T, Park J H, et al. Stress-induced transformation behavior in near-eutectic $(\text{AlNi}_2)_{70-x}\text{Co}_{30}\text{Cr}_x$ medium entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 891: 161995.
- [40] Ye F Y, Yang J, Sun P J, et al. Investigation on microstructure and properties of laser-cladding FeCrNiTa_x eutectic medium-entropy alloy coating[J]. *Chinese Lasers*, 2023, 50(20): 112-121 (in Chinese).
叶馥宇, 杨键, 孙潘杰, 等. 激光熔覆 FeCrNiTa_x 共晶中熵合金涂层组织与性能研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(20): 112-121.
- [41] Chen K, Pan H, Wu M, et al. Wear-resistant Fe₆AlCoCrNi medium-entropy alloy coating made by laser cladding[J]. *Metals*, 2022, 12(10): 1686.
- [42] Feng K, Zhang Y, Li Z, et al. Corrosion properties of laser cladded CrCoNi medium entropy alloy coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 126004.
- [43] Yuan S, Wu S, Chen T, et al. Microstructure and corrosion behavior of Co-free FeCrNiSi_{0.4} medium entropy alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Intermetallics*, 2023, 162: 108024.
- [44] Liu Y, Gu X, Lou C, et al. Influence of WC ceramic particles on structures and properties of laser cladding Ni₅₀-WC coatings[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 14-21.
- [45] Cui W, Li Y, Li F, et al. Wear and corrosion properties of in-situ TiC-TiB₂ modified Ni-based composite coatings with different B/C ratios prepared by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1): 2424-2435.
- [46] Zhang H F, Wang L, Zhang S, et al. An investigation on wear and cavitation erosion-corrosion characteristics of the TiC modified Fe-based composite coating via laser cladding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 8440-8455.
- [47] Cheng C, Li X M, Wang S C, et al. SiC enhances the structure and properties of the laser cladding layer of Ni₃₅ alloy[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2021, 45(9): 58-61 (in Chinese).
柴程, 李新梅, 王松臣, 等. SiC 增强 Ni₃₅ 合金激光熔覆层的组织和性能[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(9): 58-61.
- [48] Zhang X, Pfeiffer S, Rutkowski P, et al. Laser cladding of manganese oxide doped aluminum oxide granules on titanium alloy for biomedical applications[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 520: 146304.
- [49] Yue T M, Huang K J, Man H C. In situ laser cladding of Al₂O₃ bearing coatings on aluminium alloy 7075 for improvement of wear resistance[J]. *Surface engineering*, 2007, 23(2): 142-146.
- [50] Fazliana F, Aqida S N, Tahir A F M, et al. Thermal stability of laser-clad tool steel with fine tungsten carbide particle addition[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024: 1-18.
- [51] Chen T, Deng Z, Liu D, et al. Bioinert TiC ceramic coating prepared by laser cladding: microstructures, wear resistance, and cytocompatibility of the coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 423: 127635.
- [52] Zhang R Z, Li L J, Tang M J, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2017, 38(3): 7-11 (in Chinese).
张瑞珠, 李林杰, 唐明奇, 等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. *热处理技术与装备*, 2017, 38(3): 7-11.
- [53] Kumar S, Mandal A, Das A K, et al. Characterization and single track analysis of a metal-ceramic composite laser cladding over Ti₆Al₄V alloy[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2022, 12: 100342.
- [54] Liu H, Yu Y, Wang X, et al. Microstructure and properties of CoCrNi/nano-TiC/micro-TiB₂ composite coatings prepared via laser cladding[J]. *Materials*, 2023, 16(21): 7016.
- [55] Yan X, Chang C, Deng Z, et al. Microstructure, interface characteristics and tribological properties of laser cladded NiCrBSi-WC coatings on PH 13-8 Mo steel[J]. *Tribology International*, 2021, 157: 106873.
- [56] Wei A, Tang Y, Tong T, et al. Effect of WC on microstructure and wear resistance of Fe-based coating fabricated by laser cladding[J]. *Coatings*, 2022, 12(8): 1209.
- [57] Xu L, Song Z, Li M, et al. Self-grinding silage knife strengthened with Ni-WC alloy prepared by laser cladding[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 10236.
- [58] Jiang H, Zhikai Z, Wenqing S, et al. Microstructure and properties analysis of Ni60-based/WC composite coatings prepared by laser cladding[J]. *Heliyon*, 2024, 10(2): e24494.
- [59] Quan X, Ding L. Microstructure and property of in-situ TiC reinforced co-based composite coatings by laser cladding[J]. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11(12): 1798-1805.
- [60] Riquelme A, Rodrigo P, Escalera-Rodriguez M D, et al. Wear resistance of aluminum matrix composites' coatings added on AA6082 aluminum alloy by laser cladding[J]. *Coatings*, 2021, 12(1): 41.
- [61] Raaghini C, Verdi D. Abrasive wear performance of laser cladded Inconel 625 based metal matrix composites: effect of the vanadium carbide reinforcement phase content[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 429: 127975.

into diabetic wounds: Pathogenesis, molecular targets and treatment strategies to pace wound healing[J]. Bio-medicine & Pharmacotherapy,2019,112: 108615.

healing multifunctional dressing with antibacterial activity for sutureless wound closure and infected wound monitoring[J]. Advanced Materials,2022,34(3): 2106842.

[80] Tang N,Zhang R,Zheng Y,et al.Highly efficient self-

Research progress of functional hydrogel dressings

WEI Hui^{1,2}, WANG Weining^{1,2}, LIANG Jiachen^{1,2}, YE Qian^{1,2}, FAN Zengjie^{1,2}

(1. School of Stomatology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Dental Maxillofacial Reconstruction and Biological Intelligence Manufacturing, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Because of its excellent biochemical and mechanical properties, hydrogels are widely used in the fields of drought resistance, fresh-keeping, moisture regulation, etc., and also have outstanding advantages in the field of wound dressings. Because of its good hydrophilicity, biocompatibility and three-dimensional porous structure similar to extracellular matrix, the research of hydrogel dressings has attracted much attention, and has gradually become functional and even intelligent. However, there is still lack of systematic elaboration on functional hydrogel dressings. This paper introduces different types of functional hydrogel dressings, puts forward the challenges faced by hydrogel dressings in the process of research and application, and looks forward to the development prospects of functional hydrogel dressings in the future.

Key words: hydrogel; wound dressings; functionalization; intelligentization; antibacterial activity; composite

~~~~~  
(上接第 03257 页)

A review of laser cladding powders

GAO Shilong, ZHU Menghao, SHI Jing

(School of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266110, China)

**Abstract:** As an emerging surface coating modification technology, laser cladding plays a vital role in the preparation of surface strengthening coatings and material modification. Cladding powder material is one of the key factors determining the performance of cladding layer, and has become the focus of laser cladding technology research. This paper first introduces the core principle of laser cladding technology, then elaborates the characteristics and research progress of cladding materials such as metal powder, ceramic powder and composite powder, and finally looks forward to the future development direction of laser cladding powder materials.

**Key words:** laser cladding; surface strengthening; material modification; cladding layer; powder material