

激光熔覆制备Co基复合涂层研究现状

唐恩¹, 石佳妮¹, 王坤¹, 陈耀², 尚玉来³, 张浩¹, 池志翔²

1. 浙江工贸职业技术学院材料工程系 浙江温州 325000

2. 浙江冠正阀门股份有限公司 浙江温州 325100

3. 浙江伯特利科技股份有限公司 浙江温州 325100

摘要: 综述了激光熔覆技术在Co基复合涂层制备及性能研究方面的成果, 聚焦于熔覆材料的特性与激光熔覆工艺参数的优化。结果发现: WC-Co涂层凭借其高达1200HV的硬度, 展现了卓越的抗磨损性能, 而WC及其含量是这一性能的关键贡献者; TiN-VC增强Co基复合涂层的硬度可达550HV以上, 且随着TiN含量的增加, 涂层硬度得到显著提升。在激光熔覆过程中, 工艺参数的精确控制对涂层组织与性能具有决定性影响。研究表明: 针对Co-WC涂层, 扫描速度一般控制在6~8mm/s, 激光功率设定在1.2~1.6kW, 且当能量密度<90J/mm²时, 涂层组织与性能可得到显著优化, 这些参数的合理设定不仅确保了涂层的均匀性与致密性, 还显著提高了涂层的硬度与耐磨性。

关键词: 激光熔覆; Co基复合涂层; 工艺参数; 研究现状

Research status of Co-based composite coating prepared by laser cladding

TANG En¹, SHI Jiani¹, WANG Kun¹, CHEN Yao², SHANG Yulai³, ZHANG Hao¹, CHI Zhixiang²

1. Material Engineering Department, Zhejiang Industry and Vocational College, Wenzhou 325000, Zhejiang, China

2. Zhejiang Guanzheng Valve Co., Ltd., Wenzhou 325100, Zhejiang, China

3. Zhejiang Bethel Technology Co., Ltd., Wenzhou 325100, Zhejiang, China

Abstract: In this review, the latest research achievements in the preparation of Co-based composite coatings by laser cladding technology are preliminarily discussed. The research focuses on the characteristics of cladding materials and the optimization of laser cladding process parameters. It is pointed out that WC-Co coating shows excellent wear resistance with its hardness as high as 1200HV, and WC is the key contributor to this performance. At the same time, the hardness of TiN-VC reinforced Co-based composite coating can reach 550HV, and with the increase of TiN content, the hardness of the coating is significantly improved. According to the laser cladding process, the precise control of process parameters has a decisive influence on the microstructure and properties of the coating. The results show that when the scanning speed is generally controlled at 6~8mm/s, the laser power is set in the range of 1.2~1.6kW, and the energy density is lower than 90J/mm², the microstructure and properties of the coating can be significantly optimized. The reasonable setting of these parameters not only ensures the uniformity and compactness of the coating, but also significantly improves the hardness and wear resistance of the coating. To sum up, this study provides a certain technical reference for the preparation of Co-based composite coating by laser cladding, and has certain significance for improving the coating performance and expanding the application field.

Keywords: laser cladding; Co-based alloys; technological parameters; research status

1 序言

激光熔覆技术，又称激光包覆，是一种采用激光束加热熔覆材料和基材表面，使所需的特殊材料熔焊于工件表面的新型表面改性技术，广泛应用于部件表面修复、功能涂层制备以及原型制造等领域，尤其在航空航天、汽车制造、模具制造和能源等行业中展现出巨大潜力。激光熔覆技术具备高能量密度、精密控制以及低热影响区等显著优势，是提升材料性能和拓展新材料应用的重要手段^[1, 2]。

由于Co基复合涂层具有卓越的硬度、耐磨性、耐蚀性和高温性能，能够显著提升基体材料的工作环境适应性，延长使用寿命，因此具有广阔的应用前景和重要的研究价值。通过精心选择合金元素和强化相，可以赋予Co基涂层多种功能，如磁性、导热性和导电性等，使其在不同工程应用中发挥独特作用^[3]。Co基复合涂层不仅能增强零部件的表面硬度和耐磨性，还能有效减少摩擦损失，降低能量消耗，符合节能减排的环保要求。在提升材料性能、实现功能多样化、促进节能环保，以及推动航空航天、汽车制造业和能源领域发展等方面，Co基复合涂层展现出重要意义和广泛应用前景^[4, 5]。

本文旨在对激光熔覆Co基复合涂层领域的研究现状进行初步总结，梳理不同Co基复合涂层材料的研究进展以及激光熔覆制备工艺的现状，以期为未来的研究提供相应参考。

2 涂层材料现状

激光熔覆Co基复合涂层通常是以钴基合金为黏结相，各类硬质相（如WC、TiC、TiN等）为强化相，采用激光熔覆技术在基体材料表面制备得到的复合涂层材料。这些涂层展现出复合材料的独特特性，不仅具有Co合金本身的高强度、耐磨性和耐蚀性等特点，还融入了其他添加材料所带来的特定性能，如高硬度、耐磨性、耐热性等。为进一步提升Co基复合涂层的性能，研究人员在涂层材料选择和设计方面进行了诸多探索，以下是一些Co基复合涂层开发方面的典型进展。

2.1 WC-Co基复合涂层

WC是一种重要的硬质陶瓷材料，其硬度仅次于金刚石，在恶劣的工作环境下仍能保持良好的耐磨性，广泛应用于切削工具、耐磨部件以及高温

结构材料等，常作为硬质相添加在Co基复合涂层中。胡妙^[6]采用激光熔覆的方式在高铬铸铁基体上制备出WC-12Co耐磨涂层。图1所示为高铬铸铁基体和不同激光输出功率下高铬铸铁表面熔覆的WC-12Co耐磨涂层的表面显微硬度。结果表明，铸态高铬铸铁基体的显微维氏硬度约为550HV0.3，4种不同激光输出功率处理下的耐磨涂层的硬度均高于1200HV0.3，且随着激光输出功率的增加，Co基复合涂层硬度显著提升，最高超过了1400HV0.3。一般条件下，涂层应用与耐磨性存在正相关关系，因此，可以判定Co基复合涂层能够显著改善基体材料的耐磨性能。

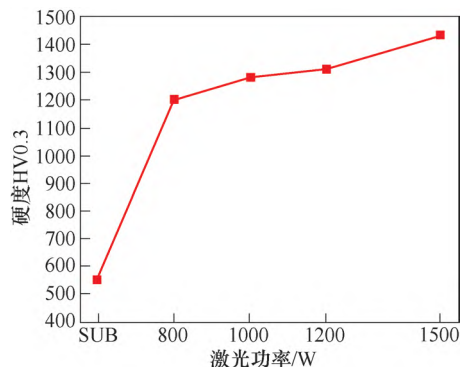


图1 高铬铸铁基体 (SUB) 和不同激光输出功率下WC-12Co涂层的表面显微硬度^[6]

张晓东^[7]在H13钢基体表面上制备了激光熔覆WC/Co-Cr复合涂层。图2所示为H13钢熔覆前后高温氧化过程中显微硬度变化曲线。从图2可看出，WC/Co-Cr复合涂层在600℃高温氧化40h后仍维持较高的硬度值，其显微硬度值保持在650HV2以上，是相同条件下H13钢硬度的2倍以上。由此可知，WC/Co-Cr复合涂层具有较好的高温热稳定性，大幅提升了H13钢基体材料的高温下使用寿命。

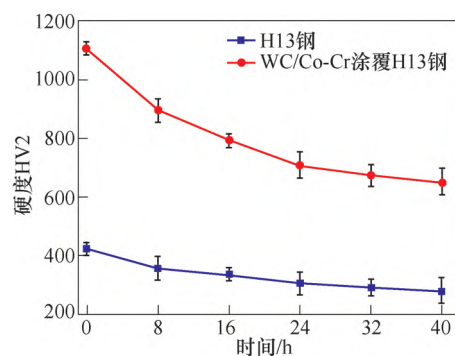


图2 H13钢熔覆前后高温氧化过程中显微硬度变化曲线^[7]

综上所述, WC-Co复合涂层拥有优异的抗磨损、耐高温性能, 其根源在于涂层中大量强化相(如WC)的存在, 它能够有效地提高涂层显微硬度, 也增强了抗微切削的能力, 以及高温条件下的综合性能, 从而显著改善涂层抗磨损性能、高温性能。

2.2 原位TiN-VC增强Co基复合涂层

刘博等^[8]在Q235钢上采用激光熔覆技术制备出Co基合金涂层, 以及TiN-VC增强Co基合金涂层。图3所示为涂层的硬度分布。结果表明, 与普通的Co基合金涂层相比, TiN-VC增强Co基合金涂层的显微硬度提高了29.77%。

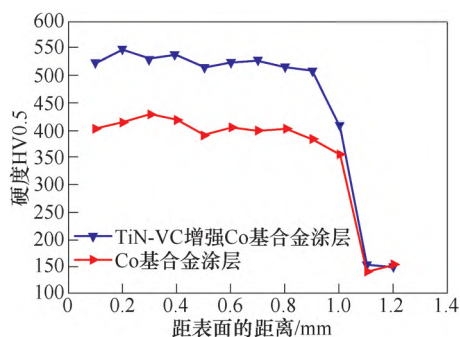


图3 TiN-VC增强Co基合金涂层和普通Co基合金涂层的硬度分布^[8]

DING等^[9]在Q235钢上制备了Co基合金涂层, 以及原位TiN-VC增强的Co基复合涂层, 并研究了两种涂层的微观结构和高温摩擦学性能, 如图4所示。由图4可知, 激光熔覆Co基合金涂层的平均显微硬度为404.13HV0.5, 原位TiN-VC增强Co基复合涂层的平均显微硬度为525.47 HV0.5, 提高了约30%。Co基复合涂层硬度的提升是由于原位形成的TiN和

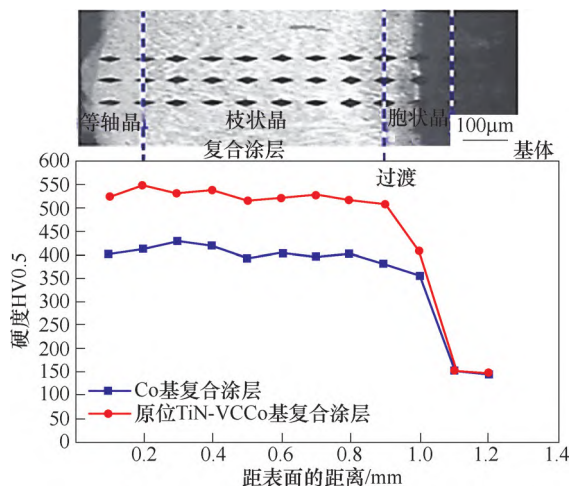


图4 TiN-VC增强Co基复合涂层和Co基合金涂层的硬度分布^[9]

VC硬质相的分散强化作用。此外, 激光熔覆过程中在 γ -Co固溶体中残留的大量合金原子也产生了固溶强化效应, 共同提高了Co基复合涂层的显微硬度。

研究同时发现, 原位TiN-VC增强Co基复合涂层中, 随着TiN含量的增加, 复合涂层中Fe、N元素含量增多, 固溶强化明显, 能够显著改善涂层硬度。

2.3 Cr_7C_3 -Co/Ni复合涂层

路世盛等^[10]利用激光熔覆技术在球墨铸铁上制备出 Cr_7C_3 -Co/Ni复合涂层。结果表明, Ni基过渡层的添加抑制了基材中C元素扩散, 从而降低了结合界面处白口化的趋势。图5所示为激光熔覆 Cr_7C_3 -Co/Ni复合涂层横截面显微硬度曲线。从图5可看出, Co基复合涂层显微硬度在462.3~477.2HV0.2范围内, 平均硬度值为471.1HV0.2, 为基材的2.1倍, 这主要源于 Cr_7C_3 陶瓷相的强化作用。

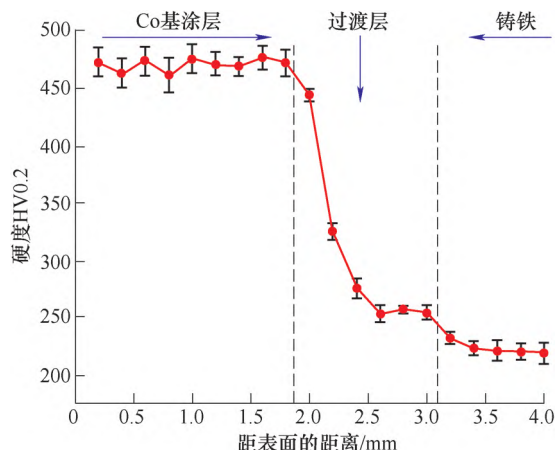


图5 激光熔覆Ni-Co复合涂层横截面显微硬度曲线^[10]

潘晓铭等^[11]在1Cr17Mn6Ni5N不锈钢表面激光熔覆Ni-Co基合金复合涂层, 并研究了复合涂层的组织及其干滑动摩擦磨损性能。图6所示为激光熔覆层的截面硬度分布。从图6可看出, Ni+30%Co复合涂层的硬度为680~780HV0.5, 且随深度增加而下

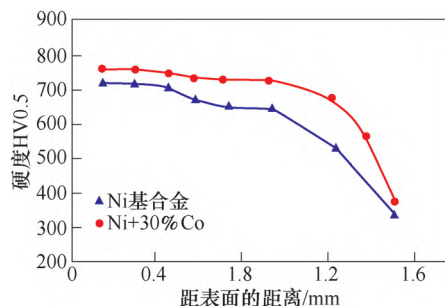


图6 激光熔覆层的截面硬度分布^[11]

降,复合涂层比Ni基合金涂层高50~70HV0.5,这是由于Co具有细化组织的作用,Co合金化产生的固溶强化及细晶强化是提高和改善复合涂层耐磨性的主要原因。

2.4 其他涂层

王东生等^[12]利用激光熔覆技术制备出NiCrBSi/WC-Co复合涂层。研究结果指出,该复合涂层的平均硬度为810HV1,显著高于基体的270HV1。

WENG等^[13]采用激光熔覆技术在Ti-6Al-4V表面制备了SiC增强Co42基复合涂层,图7所示为样品的显微硬度分布。研究结果表明,复合涂层显微硬度是基体的3倍以上,涂层的耐磨性明显改善,这主要归因于TiC、Ti₃Si₃、CoTi、CoTi₂等原位形成的硬质相强化作用。此外,高温激光熔覆过程中陶瓷颗粒在 γ -Co基体中的溶解及其随后产生的固溶强化作用,也是复合涂层硬度、耐磨性提升的重要原因。

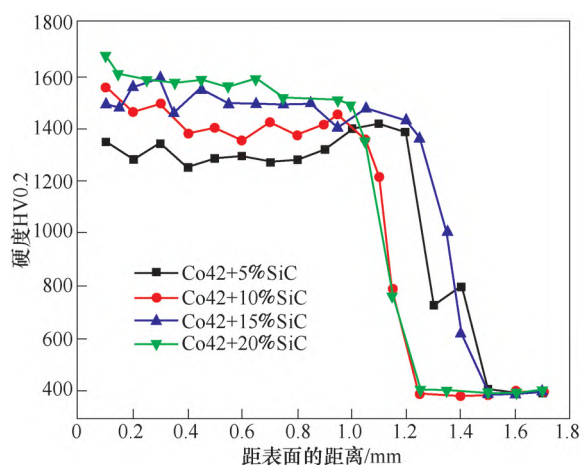


图7 SiC-Co42复合涂层的显微硬度分布^[13]

3 激光熔覆工艺现状

激光熔覆是利用高能激光束照射基材表面,使预置或同步供给的熔覆材料迅速熔化,并与基材表面薄层一同凝固,以形成具有优异性能的冶金结合熔覆层,其激光熔覆过程如图8所示。激光熔覆工艺参数主要包括激光功率、光斑直径、激光能量密度、送粉速率、扫描速度、多层搭接率或多层叠加的停光时间、涂层材料的添加方法和保护方法等^[14]。激光熔覆工艺参数对涂层质量有很大影响,因此有必要对激光功率、扫描速度、光斑直径等参数进行优化,以提高涂层的均匀性和致密性。

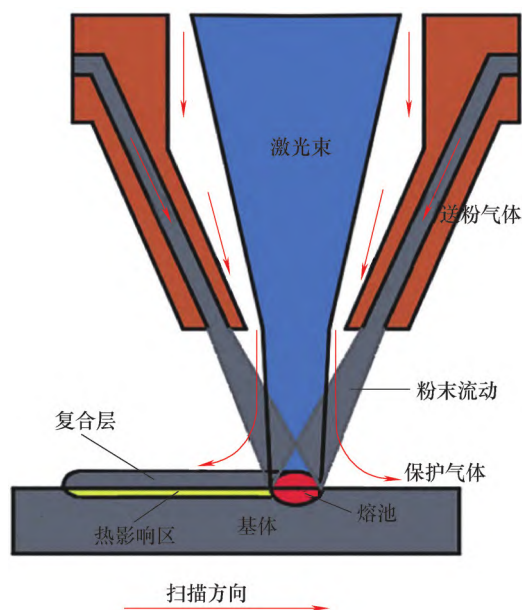


图8 激光熔覆过程示意

3.1 扫描速度

扫描速度对优化激光熔覆涂层组织以及性能非常关键,可以通过优化扫描速度来控制熔覆层宏观成形、微观组织及熔覆效率。HOU等^[15]采用激光熔覆技术在3Cr13不锈钢基体上制备了新型Co基非晶涂层。结果表明,与基体相比,3种扫描速度获得的涂层均具有较高的硬度和耐磨性。图9所示为不同扫描速度下涂层在厚度方向的显微硬度。从图9可看出,当扫描速度为6mm/s和8mm/s时,涂层的硬度极高,约为1300HV0.2;当扫描速度为10mm/s时,涂层硬度下降,约为700HV0.2;当扫描速度为6mm/s时,在距离衬底200 μ m处,硬度突然下降到700HV0.2左右,这是因为测试点位于涂层的结晶

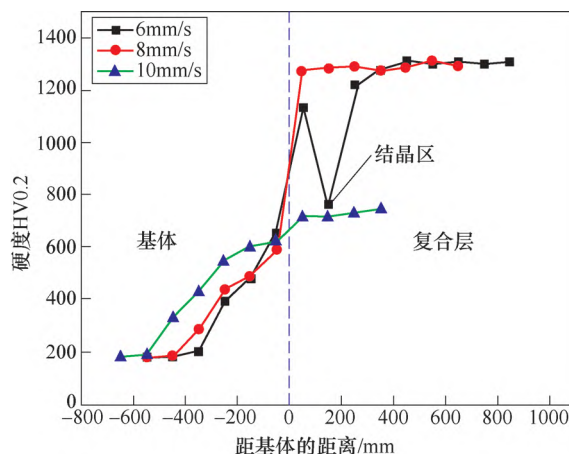


图9 不同扫描速度下涂层在厚度方向的显微硬度^[15]

区。总体而言，Co基非晶涂层的硬度较基体有了明显的提高。

何珊珊^[16]在不锈钢基体上采用同轴送粉方式制备出Stellite 12-Ti-Co熔覆层。结果表明，当扫描速度较低时，涂层组织较粗，而当扫描速度增加时，熔覆层的组织变得更细。图10所示为不同激

光扫描速度下熔覆层底层、中层、上层区域的显微组织。从图10可发现，激光扫描速度为 200mm/min 时，熔覆层区域主要由粗大的树枝晶和柱状晶组织组成；扫描速度为 400mm/min 时，熔覆层区域主要为胞状晶和较细小的柱状晶组织；扫描速度为 600mm/min 时，熔覆层区域主要为细小的树枝晶和

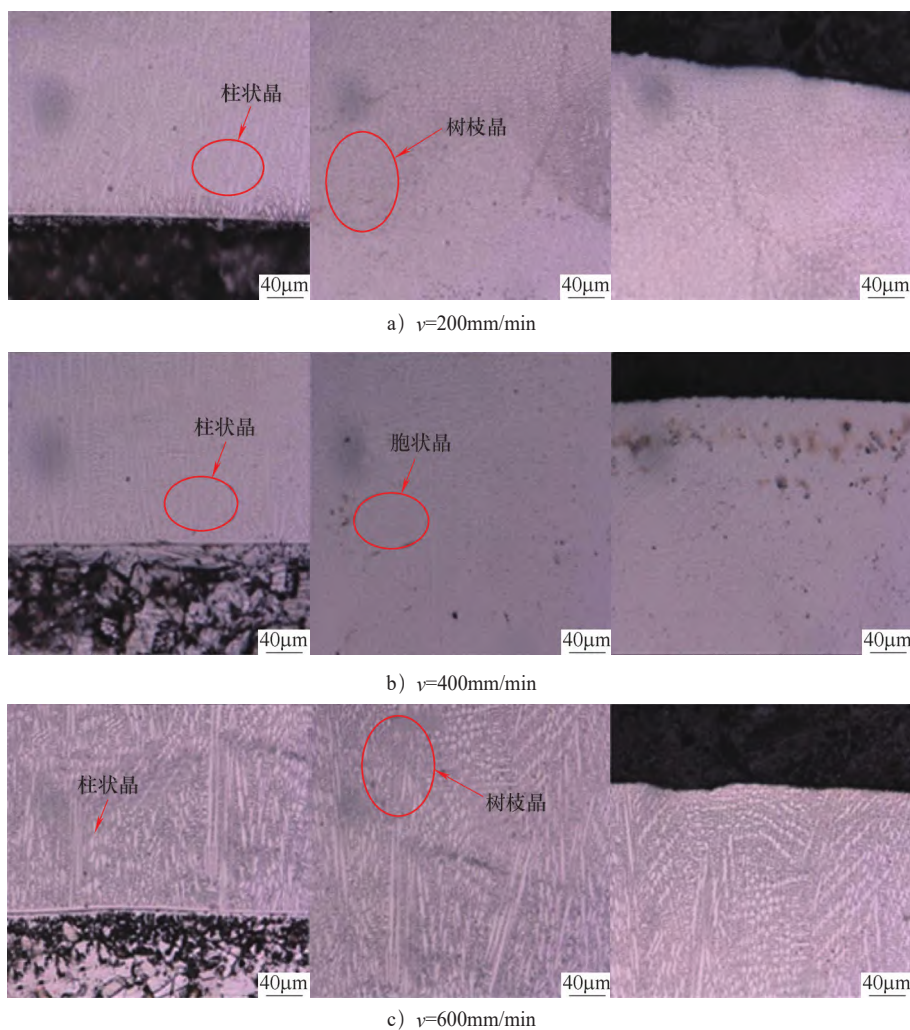


图10 不同激光扫描速度下熔覆层各区域的显微组织^[16]

柱状晶组织。

由此可见，扫描速度对熔覆层组织会产生一定的影响，扫描速度较小时，单位体积激光热输入较大，导致熔覆层组织粗大，随着激光扫描速度的增大，激光熔覆层的组织细化。

3.2 激光功率

李信等^[17]在316L基板上采用激光熔覆技术制备出Co-30%WC复合涂层，通过激光功率（1.2kW、1.6kW、2.0kW）与扫描速度（5mm/s、10mm/s、15mm/s）的正交组合，获得了A~I共计9组不同的

复合涂层试样，其金相组织如图11所示。结果表明，当激光功率为1.2kW（见图11a~c）时，熔覆层组织致密、无裂纹，存在部分等轴晶和部分枝晶组织，随扫描速度增大，气孔逐渐增多；当激光功率为1.6kW（见图11d~f）时，熔覆层组织致密、无裂纹，且随着扫描速度增大并未出现气孔；当激光功率为2.0kW（见图11g~i）时，成形的零件部分组织出现裂纹。

KIEHL等^[18]采用高功率二极管激光器在灰铸铁上同轴激光熔覆钴铬合金。激光功率分别为1.5kW

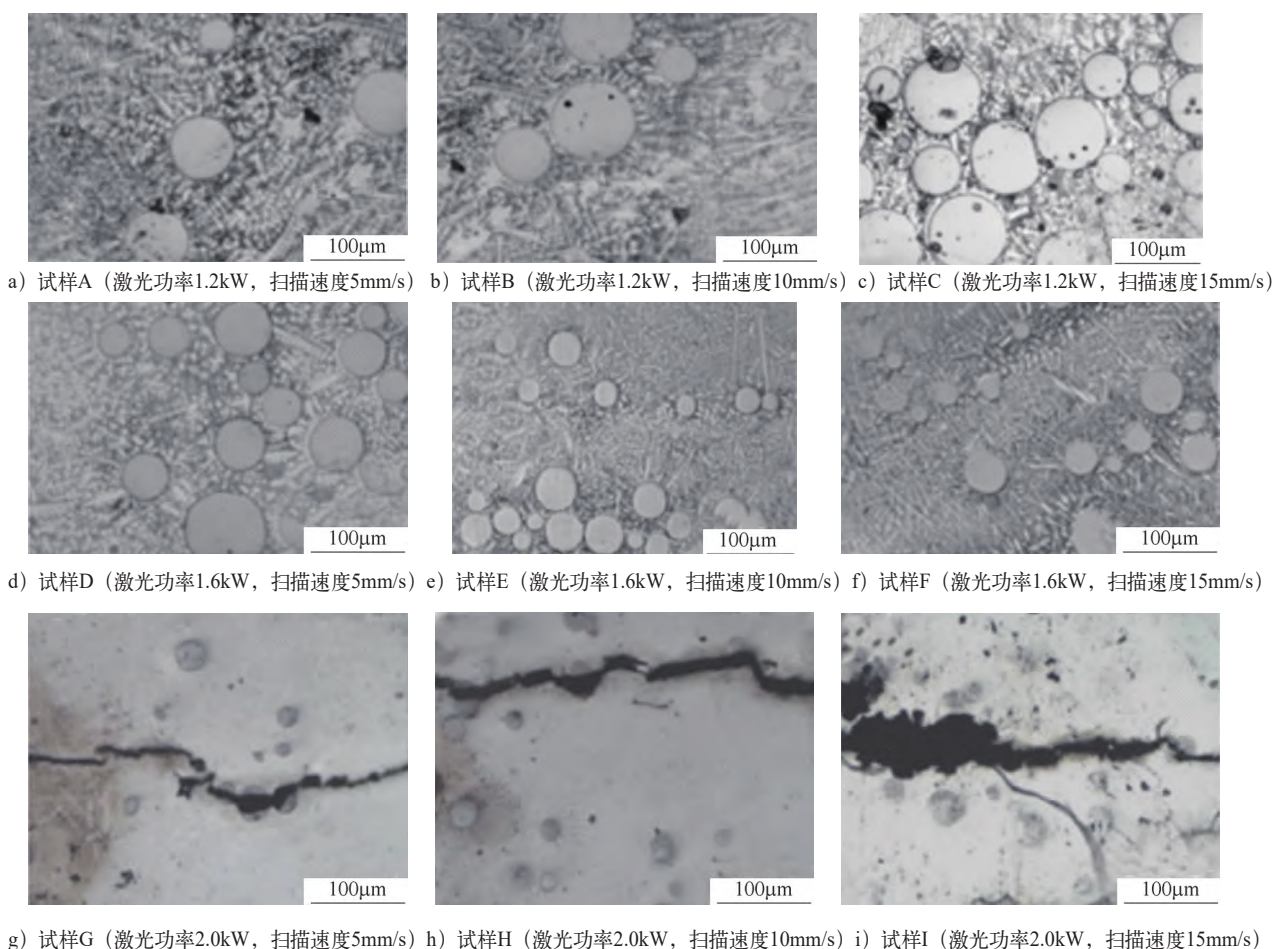


图11 不同激光功率与扫描速度组合下各试样金相组织^[17]

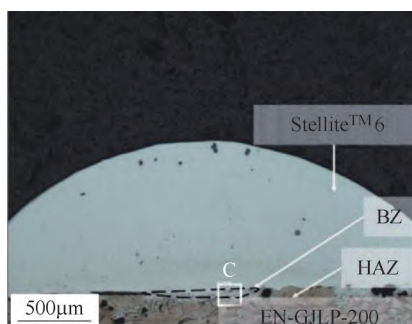
和2.0kW时钴铬合金涂层横截面显微组织如图12所示。从图12可发现,横截面组织从下到上依次由基体材料EN-GJLP-200、熔合区(BZ)、热影响区(HAZ)、界面及沉积材料Stellite 6组成。EN-GJLP-200基体具有珠光体结构,片状石墨保持原始形状(见图12c)。随着激光功率的增加,熔合区和热影响区向衬底膨胀。在部分基体上,形成了上贝氏体和板状马氏体结构,界面呈针状形态(见图12c、d)。经进一步观察,随着激光功率的增加,焊缝内的上贝氏体从中心向边缘进一步扩散(见图12d)。

3.3 能量密度

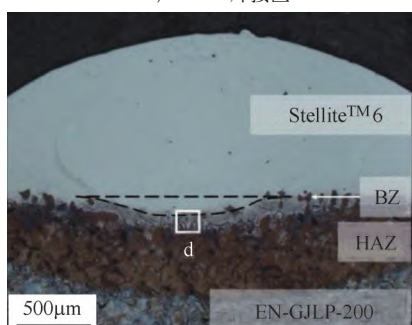
CUI等^[19]在42CrMo钢上采用激光熔覆技术制备出不同激光能量密度的5种Co基复合涂层。结果显示,涂层的几何特性与其中的马兰戈尼对流效应密切相关,随着能量密度的增加,马兰戈尼对流效应逐渐增强。图13所示为Co基复合涂层在3.5%的NaCl

溶液腐蚀30天后的形貌。图13a~c显示,当能量密度64~80J/mm²时,由于涂层中微裂纹较多,因此加剧了氯离子对涂层的腐蚀;图13d表明,当能量密度为90J/mm²时,涂层的耐蚀性达到了最佳状态;图13e显示,当能量密度超过90J/mm²时,涂层中裂缝增多,对成形质量造成了负面影响,涂层中存在1个长裂纹,氯化钠晶体主要分布在裂纹附近,这是由于随着能量密度的增加,即激光热源的输入量增大,进而引起涂层的温度梯度增大,使涂层中的残余应力也增大,较大的残余应力不仅导致涂层出现较大的裂纹,而且会增加Co基组合物涂层中的位错密度,降低涂层的修复能力,最终使裂纹在腐蚀介质中进一步扩大。

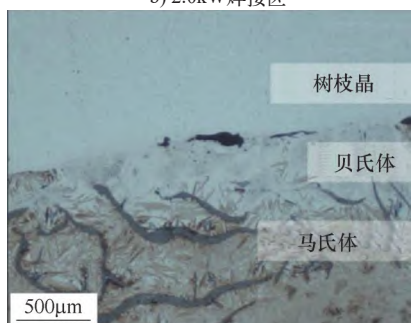
WANG等^[20]采用激光熔覆技术在Q235钢基体上成功制备了(CoCrFeNi)95Nb5高熵合金(HEA)涂层。结果表明,随着激光能量密度的增加,HEA涂层中Laves相的析出逐渐减少,Fe元素在基体中的



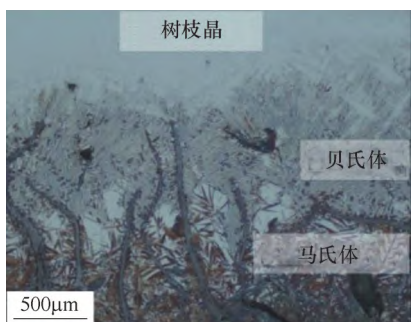
a) 1.5kW焊接区



b) 2.0kW焊接区



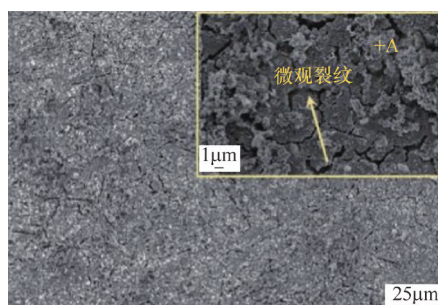
c) 1.5 kW界面



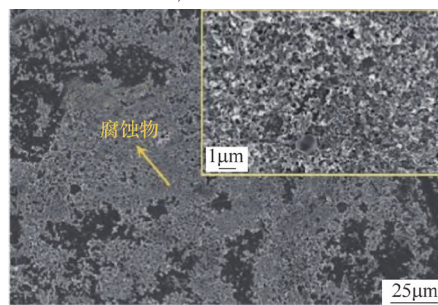
d) 2.0kW界面

图12 不同激光功率下钴铬合金涂层横截面显微组织^[18]

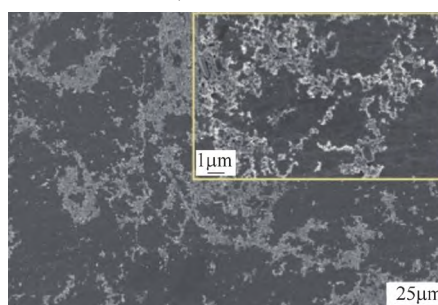
扩散加剧，进而影响了HEA的完整性，降低了HEA涂层的显微硬度。图14所示为不同激光能量密度制备的 (CoCrFeNi) 95Nb5 HEA涂层的显微硬度。从图14可看出，激光能量密度对显微硬度有显著影响，随激光能量密度提升，HEA涂层中Laves相析出减少，同时基体中的Fe元素在涂层中的扩散加剧，



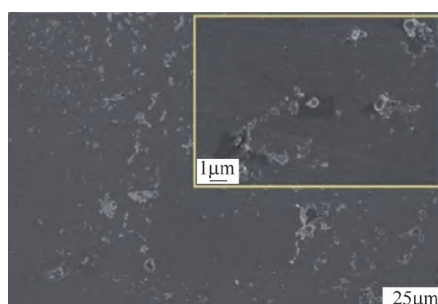
a) 64J/mm²



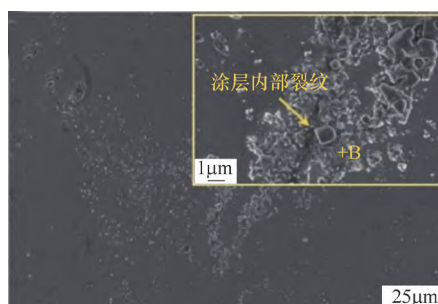
b) 72J/mm²



c) 80J/mm²



d) 90J/mm²



e) 100J/mm²

图13 不同能量密度下Co基复合涂层的腐蚀形貌^[19]

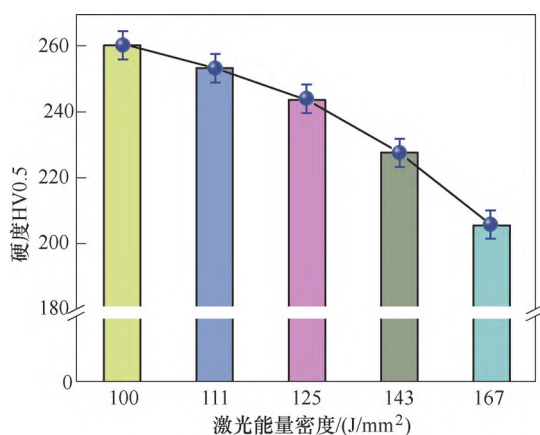


图14 不同激光能量密度获得的 (CoCrFeNi) 95Nb5 HEA 涂层的显微硬度^[20]

降低了大原子半径Nb元素在HEA在涂层中的相对含量, 导致HEA涂层中的析出强化、固溶强化效应降低。

4 结束语

本文从熔覆材料的材料研究、激光熔覆的工艺参数等方面, 对激光熔覆制备Co基复合涂层的国内外研究现状进行了总结和分析, 得出如下结论。

1) Co基复合涂层具有高硬度以及突出的高温稳定性能, 这得益于复合涂层中大量陶瓷硬质相的存在。随着硬质相含量增加, 涂层硬度提升, 耐磨性能明显改善, 同时, Co合金起到了黏结剂的作用。WC-Co涂层凭借其高达1200HV的硬度, 展现了卓越的抗磨损性能, 而WC及其含量是这一性能的关键贡献者; TiN-VC增强Co基复合涂层的硬度可达550HV以上, 且随着TiN含量的增加, 涂层硬度得到显著提升。

2) 激光熔覆关键工艺参数对涂层组织性能具有重要影响, 针对Co-WC涂层, 扫描速度一般控制在6~8mm/s, 激光功率设定在1.2~1.6kW, 能量密度<90J/mm²时, 涂层组织与性能可得到显著优化。这些参数的合理设定不仅确保了涂层的均匀性与致密性, 还显著提高了涂层的硬度与耐磨性。

参考文献:

- [1] OUYANG C, WANG R, BAI Q, et al. Aging strengthening treatment of laser cladding Co-based alloy coating[J]. Materials Letters, 2022, 313: 131746.
- [2] DING L, HU S, QUAN X, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of VN alloy/Co-based composite coatings[J]. Surface and

Coatings Technology, 2017, 313: 355-360.

- [3] QI K, YANG Y, SUN R, et al. Effect of magnetic field on crack control of Co-based alloy laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107129.
- [4] DING L, QUAN X. Effect of surface micro-texturing on the tribological properties of TiB-TiC/Co-based coatings by laser cladding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2023, 32 (5): 1406-1415.
- [5] 崔陆军, 张猛, 曹衍龙, 等. 面向泵阀的钴基合金激光熔覆层组织与性能特征[J]. 表面技术, 2019, 48 (11): 333-340.
- [6] 胡妙. 利用激光熔覆在钢铁表面制备WC-Co耐磨涂层的工艺及机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [7] 张晓东. 激光熔覆制备WC/Co-Cr复合涂层及其高温磨损与高温氧化特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [8] 刘博, 马志伟, 张唐海, 等. 激光熔覆制备的TiN-VC增强Co基合金涂层的微观结构和耐磨性研究[J]. 热处理, 2022, 37 (6): 19-22.
- [9] 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.
- [10] 路世盛, 周健松, 王凌倩, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆Ni-Co复合涂层的耐腐蚀及高温摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2022, 35 (3): 122-131.
- [11] 潘晓铭, 张琳琳, 张大伟, 等. 激光熔覆Ni-Co基合金复合涂层的组织与耐磨性[J]. 热加工工艺, 2015, 44 (4): 155-157, 160.
- [12] 王东生, 田宗军. 激光熔覆NiCrBSi/WC-Co复合涂层的组织与耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43 (11): 16-20.
- [13] WENG F, YU H, LIU J, et al. Microstructure and wear property of the Ti₃Si₃/TiC reinforced Co-based coatings fabricated by laser cladding on Ti-6Al-4V[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 156-162.
- [14] 张好强, 刘豪, 刘印, 等. 激光熔覆制备钴基复合涂层研究现状分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (9): 90-98.
- [15] HOU X, DU D, CHANG B, et al. Influence of scanning speed on microstructure and properties (下转第30页)

至1003.21 μm , 磨痕深度由21.81 μm 降至19.71 μm 。未施加超声振动试样的磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损。施加超声振动后其磨损机制主要为氧化磨损, 伴随着少部分的接触疲劳磨损。

参考文献:

- [1] 倪浩涵, 曾琦, 张恺, 等. 激光粉末床熔融GH3536合金高温低周疲劳行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (6) : 2302-2308.
- [2] 计霞, 楚瑞坤, 陈志茹, 等. 激光选区熔化GH3536高温合金的成形工艺及组织性能[J]. 金属热处理, 2020, 45 (11) : 205-210.
- [3] 吴建, 张甲甲, 郭坤, 等. 镍基高温合金叶片叶尖磨削砂轮系统加工稳定性研究[J]. 工具技术, 2021, 55 (3) : 20-25.
- [4] 沈沐宇, 谢寅, 李继康, 等. 激光功率对双激光粉末床熔融GH3536合金搭接区组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2023, 50 (24) : 125-134.
- [5] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [6] 孙小峰, 荣婷, 黄洁, 等. 激光增材制造技术在航空制造领域的研究与应用进展[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (3) : 7-14.
- [7] 王树森, 郝铭淞, 梁静静, 等. 热处理对激光立体成形GH3536力学性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72 (5) : 508-513.
- [8] 陈健, 姚喆赫, 姚建华, 等. 超声振动辅助激光熔覆技术研究进展综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64 (12) : 36-46.
- [9] NING F, HU Y, LIU Z, et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: a feasibility study[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 771-778.
- [10] ZHANG M, ZHAO G L, WANG X H, et al. Microstructure evolution and properties of in-situ ceramic particles reinforced Fe-based composite coating produced by ultrasonic vibration assisted laser cladding processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126445.
- [11] MA G, YAN S, WU D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad yttria stabilized zirconia coating[J]. Ceramics International, 2017: S0272884217307101.
- [12] WEN X, CUI X, JIN G, et al. Design and characterization of FeCrCoAlMn0.5Mo0.1 high-entropy alloy coating by ultrasonic assisted laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155449.
- [13] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46 (1) : 114-122.

MW 20240719

(上接第24页)

- of laser clad Fe-based amorphous coatings[J]. Materials, 2019, 12 (8) : 1279.
- [16] 何珊珊. 不锈钢表面激光熔覆Co基合金复合涂层的组织及性能的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2019.
- [17] 李信, 曲庆文, 崔林. 工艺参数对激光增材熔覆成形Co基WC复合涂层的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (2) : 89-93.
- [18] KIEHL M, SCHEID A, GRAF K, et al. Coaxial laser cladding of cobalt-base alloy stellite™ 6 on grey cast iron analysis of the microstructural and mechanical properties depending on the laser power[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32 (8) : 3821-3838.
- [19] CUI C, WU M, MIAO X, et al. The effect of laser energy density on the geometric characteristics, microstructure and corrosion resistance of Co-based coatings by laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 2405-2418.
- [20] WANG W R, QI W, ZHANG X L, et al. Superior corrosion resistance-dependent laser energy density in (CoCrFeNi) 95Nb5 high entropy alloy coating fabricated by laser cladding[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28 (5) : 888-897.

MW 20240715