

激光与光电子学进展

激光熔覆制备钴基复合涂层研究现状分析

张好强¹, 刘豪¹, 刘印¹, 李强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 激光熔覆具有熔覆层组织致密、涂层与基体结合良好、稀释率及变形小等优点。钴基合金因具有高硬度, 以及较好的耐磨性、耐高温性和耐蚀性等特点, 在激光熔覆中得到广泛使用。本文对激光熔覆制备钴基合金涂层的国内外研究现状进行了分析, 探讨了激光功率、扫描速度和送粉速率等主要工艺参数对涂层熔覆质量和性能的影响, 总结了硬质相陶瓷粉末、稀土和固体润滑剂等添加剂, 以及其他辅助工艺对改善钴基合金熔覆性能方面的相关研究。最后对激光熔覆钴基合金的不足和发展趋势进行了总结和展望。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 工艺参数; 钴基合金; 添加剂

中图分类号 TN249; TG174.44

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221037

Research Status and Analysis of Co-Based Composite Coatings Prepared by Laser Cladding

Zhang Haoqiang¹, Liu Hao¹, Liu Yin¹, Li Qiang², Hou Suoxia^{1*}¹College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology,
Tangshan 063210, Hebei, China;²Tangshan Zhongmao Technology Co., Ltd., Tangshan 064300, Hebei, China

Abstract Laser cladding has the advantages of compact microstructure, good bonding between coating and substrate, and small dilution rate and deformation. Co-based alloy is widely used in laser cladding because of its high hardness, good wear resistance, high temperature resistance, and corrosion resistance. In this paper, the research status of laser cladding preparation of cobalt-based alloy coatings at home and abroad is analyzed, and the influence of main process parameters such as laser power, scanning speed, and powder feeding rate on the quality and performance of coating cladding is discussed. The related researches on additives such as hard phase ceramic powder, rare earth and solid lubricant additives, and other auxiliary processes to improve the performance of Co-based alloys are summarized. Finally, the insufficiency and development trend of laser cladding cobalt-based alloys are summarized and prospected.

Key words laser technique; laser cladding; process parameters; Co-based alloy; addition agent

1 引言

激光熔覆是一种兴起于 20 世纪 80 年代的先进材料表面改性技术^[1]。它以高能激光束作为热源, 将熔覆材料和基体表面一起熔凝, 使之在基体表面形成与其冶金结合的熔覆层, 从而修复已磨损表面或强化现有金属表面^[2-3]。采用激光熔覆技术可以在廉价或者性能较低的基体表面制备高性能合金涂层, 改善基体性能, 降低成本和能源消耗^[4]。图 1 为熔覆过程示意图。

随着工业发展, 越来越多的材料应用于高温、高压和磨损等环境, 为此科研人员提出许多表面强化技术用来提升合金表面性能, 主要方法有: 等离子喷涂、物理气相沉积、堆焊、电镀等^[5]。与其他表面处理方法相比, 激光熔覆技术具有以下特点: 1) 激光能量密度较高, 加工过程快热快冷, 对基材热影响区变形小; 2) 冷却速度快, 涂层晶粒细小, 组织致密; 3) 稀释率低, 与基体呈冶金结合; 4) 材料应用范围广^[6-8]。因此, 该技术广泛应用于铁路、航空航天、汽车、航海等行业, 具有广

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-04-06; 录用日期: 2022-05-20; 网络首发日期: 2022-05-30

基金项目: 河北省自然科学基金(E2021209026)

通信作者: *housuoxia@163.com

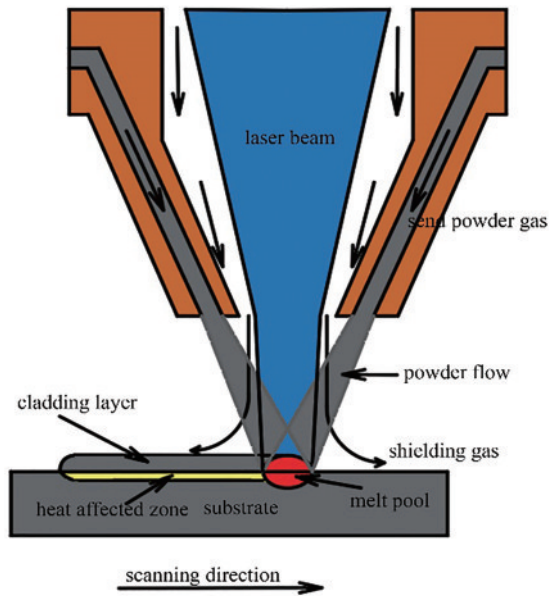


图 1 激光熔覆过程示意图

Fig. 1 Schematic of laser cladding process

表 1 表面技术特性对比^[1-2]Table 1 Comparison of surface technical characteristics^[1-2]

Type of surface technology	Single coating thickness / mm	Bonding	Dilution rate / %	Environmental protection level
Laser cladding	0.5-2	Metallurgical bonding	<10	No pollution
Plasma spray	0.05-0.5	Mechanical bonding	5-15	Noise + dust pollution
Electroplating	<0.1	Physical bonding	-	Heavy metal pollution
Overlaying	0.3-1.0	Metallurgical bonding	10-20	No pollution
Ultra-high speed flame spraying	0.01-0.05	Mechanical bonding	5	Dust + noise pollution

2 激光熔覆工艺参数对钴基涂层的影响

工艺参数将直接影响激光对粉末和基体的作用,从而改变熔池的流动性、传质和晶相组织变化。适当的工艺参数能够降低熔覆层内部缺陷产生率,提高熔覆层质量^[14]。激光熔覆工艺参数主要包括:激光功率、扫描速度、送粉速率、离焦量等。

2.1 激光功率

张昌春等^[15]研究了激光功率对涂层性能的影响。结果表明,功率为 600 W 时,未熔 WC 颗粒较多,但随着激光功率的增加,未熔颗粒逐渐熔化充分,涂层整体硬度和耐磨性提高。胡妙^[16]在不锈钢基体上分别熔覆 WC-12Co 和 WC-25Co 复合粉末,研究了不同激光功率(900 W、1100 W、1300 W、1500 W 和 1900 W)下涂层的性能。结果表明:功率小于 1500 W 时,涂层内有大量残余颗粒未完全熔化;功率大于 1500 W 时,粉末颗粒几乎完全熔化,涂层底部出现气孔和裂纹。随着激光功率的增加,涂层显微硬度先增加后减小。王航

阔的应用前景^[9]。激光熔覆技术与其他表面技术的特性对比见表 1。

目前激光熔覆常用的两种送粉方式是同轴送粉和预置送粉。同轴送粉法的工作原理为粉末被载气从喷嘴喷出,与激光相互接触,扫描过程同时进行,短时间熔化,形成熔覆层。预置粉末法是将熔覆材料直接或做成涂层预置在基体上,通过激光束扫描,粉末或涂层被照射熔化,迅速冷却凝固^[9-10]。预置粉末存在粉末烧损严重、涂层有气孔和裂纹等问题。同轴送粉激光利用率高、成形性好、变形小,适用于大面积熔覆,因而得到了广泛应用,但对粉末颗粒度和流动性要求较高^[11-12]。

镍基涂层具有耐磨耐蚀、抗高温氧化性好等优点,但其耐高温性能较差;铁基合金价格低廉、耐磨性好,但涂层易产生裂纹;钴基合金具有高硬度、耐磨性、耐腐蚀性好等优点,Co 元素熔点较低,在熔覆过程中最先熔化,易于与其他元素结合,经常被用来作为黏结剂^[13]。本文主要从激光熔覆钴基复合涂层工艺参数、熔覆材料及复合工艺对目前国内外研究现状进行综述。

等^[17]在钛合金表面制备了钴基/氧化石墨烯(GO)复合涂层。图 2 为不同功率硬度曲线图,可以看出在低功率作用下,GO 粉末中的 C 元素与基体原位合成 TiC,钴基粉末中 Co 元素与基体合成 Co₂Ti,二者共同作用提高涂层硬度。在功率较高时,GO 迅速分解,晶粒粗大,硬度较低。Bartkowski 等^[18]在低碳钢基体上制备了 Stellite6/WC 复合涂层,发现激光功率过大会导致 WC 颗粒部分熔融,涂层材料与基体材料强烈混合,基体中 C 和 W 富集,涂层中铁含量增加,显微硬度下降。

激光功率直接影响熔覆层质量,适当的激光功率可以减少裂纹、空隙,并产生性能良好的熔覆层。激光功率过小时,粉末不会完全熔化,激光功率过大时,熔池中对流加剧,引起基体过多熔化造成元素扩散,进而增加稀释率,造成熔覆层性能下降。

2.2 扫描速度

叶宏等^[19]在 H13 钢表面制备 Co 基涂层,结果表明,随着扫描速度的增加,熔高和熔宽减小,涂层孔洞、裂纹数量减少。王涛等^[20]在蠕墨铸铁表面制备了钴基合金涂层,结果表明:扫描速度为 5 mm/s 时,较多基体

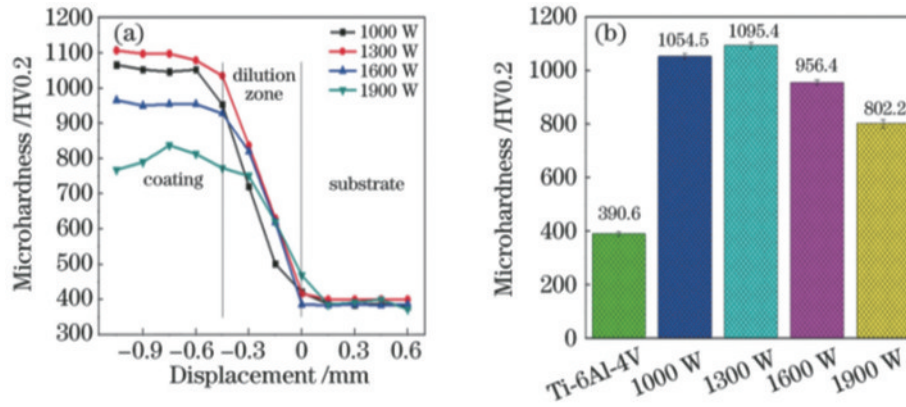


图 2 显微硬度图^[17]。(a)不同功率下显微硬度图;(b)平均硬度对比

Fig. 2 Microhardness diagram^[17]. (a) Microhardness diagram at different powers; (b) average hardness comparison

熔化,熔覆层较厚;扫描速度为 11 mm/s 时,粉末未完全熔化,有夹渣;扫描速度为 8 mm/s 时,涂层厚度合适,没有夹渣或孔隙,结合良好。何珊珊^[21]在不锈钢基体上制备了 Stellite12/Ti/B₄C 涂层,结果表明,在 200~400 mm/min 时,速度越大,涂层组织越细小均匀。但是速度过大,涂层吸收激光束能量减少,粉末熔化量减少,枝晶粗大引起硬度降低。崔岗等^[22]在 410 不锈钢表面熔覆 Co 基涂层,发现随着扫描速度的增大,裂纹敏感性和硬度提升。

扫描速度通过影响激光功率密度来间接影响熔覆层质量。扫描速度过快,粉末不完全熔化,并且会出现裂纹;扫描速度过慢,单位内吸收热量较多,熔覆层温度过高,部分元素发生烧损甚至挥发,还会导致稀释率增加,性能降低。

2.3 送粉速率

送粉速率是影响粉末流出速度的重要参数。何珊珊^[21]研究了送粉速率对 Stellite12 涂层显微硬度及组织的影响。结果表明,随着送粉速率的增大,温度梯度变小,冷却时间缩短,出现较细小的树枝晶、柱状晶,熔覆层显微硬度呈上升趋势。Bartkowski 等^[18]在低碳钢上制备了 Stellite6/WC 复合涂层,结果表明,增大送粉速率对涂层的耐磨性没有显著影响,但涂层厚度增加,导致涂层使用寿命增加。

当送粉速率较小时,激光束通过粉末进入到基体内的能量较多,粉末吸收能量较少,熔化量较少,导致涂层高度降低;当送粉速率较大时,激光束通过粉末进入到基体的能量较少,熔池深度较小,结合强度较低^[23]。在激光熔覆过程中,送粉速率要搭配合适的激光功率,使稀释率控制在 5%~10% 之间。

3 激光熔覆钴基合金材料

钴基合金具有较高的尺寸稳定性,以及优异的耐磨耐蚀、抗氧化性能,可分为自熔性和非自熔性合金,二者区别在于是否含 B 元素。自熔性合金由于 B 元素的加入,初熔温度较低,成形质量好,但其高温综合性

较差;非自熔性合金不含 B,熔点较高,可在高温下使用,但其表面成形性较差。激光熔覆中常用的钴基非自熔性合金有:Stellite1、Stellite6、StelliteF 等^[24]。

3.1 单一钴基合金粉末

单一钴基合金粉末以 Co 元素为主,并含有一定量的 Cr、W、Mo、Ni 等合金元素。Falqueto 等^[25]在不锈钢基体上制备了 Stellite1 涂层,合金涂层在室温和 500 °C 下均表现出良好的耐磨性。张猛^[26]在中碳素钢基体熔覆钴基合金,结果表明,熔覆层显微硬度是基材的 2.9 倍,耐磨性提高了 5.8 倍。Guo 等^[27]在轮轨表面熔覆 Co 基合金,经过处理的轮轨试样,平均硬度为 438 HV_{0.5},耐磨性提高。崔陆军等^[28]在 ZG45 表面制备钴基合金,在一定范围内,稀释率越低的熔覆层硬度越高,平均显微硬度达到基体的 2.8 倍,耐腐蚀性也有所提升。叶宏等^[29]在 H13 钢表面制备 Co 基合金,硬度可达 706 HV_{0.2}。

在基体表面熔覆钴基合金粉末,熔覆层的硬度、耐磨耐蚀性均得到显著提高,但是单一的钴基合金粉末难以满足耐腐蚀性、耐磨性要求高的环境,因此需要在熔覆材料中添加增强相。

3.2 金属陶瓷复合粉末

由于单一钴基粉末通常很难满足使用要求高的环境,通过添加硬质陶瓷粉末制成金属陶瓷复合粉末,可以获得性能更好的钴基复合涂层。金属陶瓷复合粉末可以将金属的优异力学性能和陶瓷粉末的耐磨性能有效结合起来^[5]。

TaC 具有硬度高、熔点高、化学稳定性好、耐化学侵蚀和热冲击性能好等优良性能。Li 等^[30]在镍铝青铜基体表面制备 TaC/StelliteX-40 复合涂层,图 3 为不同 TaC 质量分数的涂层扫描电镜(SEM)照片。可以看出:不含 TaC 的涂层主要由粗柱状枝晶组成;TaC 质量分数为 10% 和 20% 时,枝晶相得到细化;TaC 质量分数为 30% 时,枝晶变大,TaC 颗粒以花瓣形式存在。结果表明,TaC 质量分数为 20% 时,涂层中所含的 Cr₃C₂ 和 TaC 能有效提高涂层的耐磨耐蚀性。

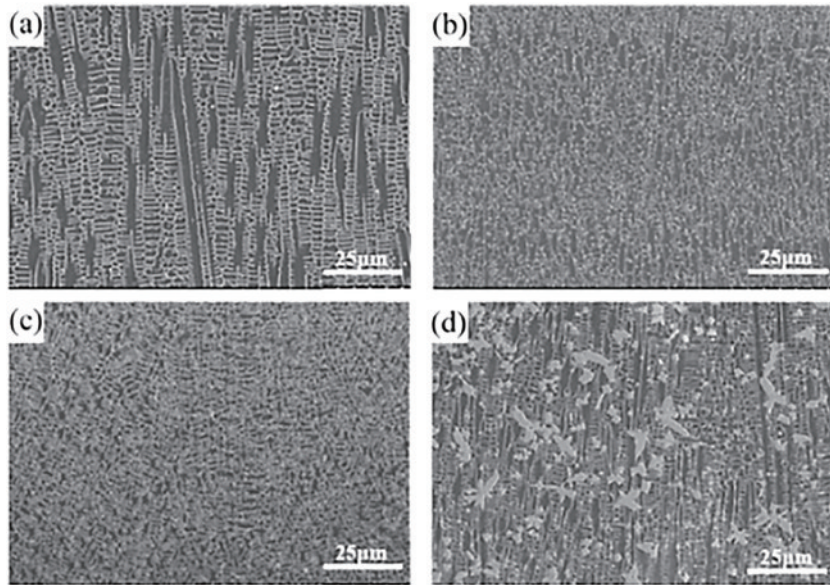


图 3 不同 TaC 质量分数的涂层 SEM 照片^[30]。(a) 0%；(b) 10%；(c) 20%；(d) 30%

Fig. 3 SEM images of the coating with different TaC mass fractions^[30]. (a) 0%；(b) 10%；(c) 20%；(d) 30%

TiC 具有较高的熔点和硬度、易呈弥散分布,以及优异的摩擦学性能^[31]。李根^[24]向钴基合金中添加不同含量(质量分数,下同)TiC,结果表明:添加 TiC 含量 $\leq 10\%$ 时,熔覆层硬度与纯钴基合金相比不升反降,耐磨性变差;添加 TiC 含量 $\geq 20\%$ 时,硬度和常温耐磨性显著提升。童文辉等^[32]在球墨铸铁基体制备 30% TiC/Co 基合金熔覆层,最大硬度为基体的 5 倍以上。Quan 等^[31]在 45 钢表面制备了原位 TiC 增强 Co 基涂层,随着 TiC 含量的增加,组织更加细小、均匀,显微硬度逐渐提高。

WC 粉末具有硬度和熔点高、耐腐蚀、耐磨损、耐高温等特点,在激光熔覆方面得到了广泛应用^[33-34]。许苗苗^[35]在钛合金基体表面熔覆 WC-12Co 和 WC-25Co。结果表明:WC-12Co 熔覆层的陶瓷颗粒在底部聚集,存在孔洞;WC-25Co 熔覆层形貌良好,硬度和耐磨性明显提高。潘邻等^[36]研究了不同含量 WC 对激光熔覆钴基涂层的影响,结果表明:硬度随 WC 含量的增加而提高。何波等^[37]在 45 钢基体表面熔覆 WC/Co 基合金涂层,与纯 Co 基合金涂层相比,含 WC 涂层的硬度和耐磨性均明显提高。李春燕等^[38]在钛合金基体表面激光熔覆 Co-WC 涂层,WC 含量大于 45%,硬度值下降。Bartkowski 等^[39]在低碳钢表面制备 Stellite6/WC 复合涂层,WC 含量的增加引起硬度增加,但会引起耐蚀性下降。

龚佑品等^[40]在低碳钢表面制备 TiB₂/Co 金属陶瓷复合涂层,结果表明,TiB₂/Co 金属陶瓷复合涂层的硬度及室温滑动磨损性能明显优于 Co 基涂层。马海波等^[41]在 Ti-5Al-2.5Sn 合金上熔覆 Co 基合金粉末,原位合成 TiB 系陶瓷颗粒增强 Co 基涂层,其显微硬度和耐磨性显著提高。Weng 等^[42]采用钴基合金和 SiC 熔覆

钛合金,结果表明,SiC 溶解并与 Ti 反应生成 Ti₅Si₃和 TiC,硬度提高到基体的 3 倍以上,耐磨性提高 18.4~57.4 倍。

有时单相陶瓷增强相难以满足使用需求,有学者采用多种陶瓷粉末复合作为增强相。童文辉等^[43]在球墨铸铁表面制备 TiC 和 B₄C 复合陶瓷粉末增强的 Co 基合金复合涂层,平均硬度最大为 1379.28 HV_{0.2}。Zhang 等^[44]研究 VC、Cr₃C₂ 对 WC 在钴黏结剂中的影响,结果表明,VC 和 Cr₃C₂ 的相互作用抑制了 WC 的分解,提高了耐磨性,其性能优于单独添加 VC 或 Cr₃C₂ 的熔覆层。由此可知,使用多种陶瓷粉末复合作为增强相的熔覆层,其硬度和耐磨性优于单相。Liu 等^[45]在 TA15 合金表面制备原位合成的 TiC、TiB₂、SiC 等多颗粒增强钴基复合涂层,熔覆层显微硬度为 1000 HV,磨损率约为基体的 1/12。

综上所述,在钴基合金粉末中加入 TaC、TiC、WC 等陶瓷粉末,熔覆层的性能得到了极大改善,比单一钴基合金粉末性能更好。研究中应合理控制陶瓷粉末含量,防止含量过多引起涂层耐蚀性下降。原位合成的硬质颗粒可以避免直接加入陶瓷粉末引起的裂纹,但是直接添加可以更好控制含量。

3.3 添加剂

3.3.1 稀土或合金元素

稀土元素具有优异的物理和化学特性,成功应用于冶金、石油、电子等领域,称为金属中的维生素^[46]。陶瓷颗粒在高温熔池内会发生溶解,涂层可塑性和韧性会有所降低。部分学者通过添加合金元素或稀土氧化物来提高涂层硬度、耐蚀和耐磨性,同时涂层的强度和韧性也有所提升^[47]。

张春华等^[46]在 316L 不锈钢表面制备添加 La₂O₃ 和

CeO₂的 Co 基合金熔覆层,结果发现:含量 0.5% CeO₂和 La₂O₃的显微组织明显细化;添加含量 1.0% CeO₂和 La₂O₃时,组织略为粗化,添加稀土可以使晶粒细化,耐腐蚀性提高,而过量稀土氧化物会引起硬度下降。Lu 等^[48]研究了 Y₂O₃对激光熔覆钴基复合涂层性能的影响,Y₂O₃可以细化和净化涂层组织,减少气孔和裂纹,改善涂层的磨损性能。Weng 等^[49]发现当 Y₂O₃质量分数为 1.0% 时,组织明显细化,硬度和耐磨性显著提高。杨尚磊等^[50]在 Ni 基合金基体上制备纳米 Y₂O₃/钴基合金涂层。结果表明,涂层的显微硬度和耐磨性显著提高。

李志远等^[51]研究了 Ti 对 Co 基合金的影响,Ti 元

素的加入可以细化组织,抑制枝晶生长,使组织等轴化,涂层的硬度和耐磨性得到提高。Farnia 等^[52]研究了 Ta 对激光熔覆 Stellite6 合金的影响,Ta 的加入使显微组织细化,随着 Ta 含量的增加,硬度变得更加均匀。

综上可知,在钴基合金中添加适量稀土氧化物和合金元素可以细化晶粒、减少气孔裂纹形成,从而提升熔覆层的硬度和耐磨性。

3.3.2 固体润滑剂

随着航空航天技术的快速发展,在极端苛刻条件下,超越了常规润滑剂的使用极限,而添加固体润滑剂可以降低机器部件在高速、高负荷条件下的磨损率和摩擦系数。常用固体润滑剂对比见表 2。

表 2 常用固体润滑剂对比^[53-55]

Table 2 Comparison of common solid lubricants^[53-55]

Type	Material	Benefit	Challenge
Layered solid	Graphite, sulfide(MoS ₂ , GaS, WS ₂), h-BN	Lowest friction and wear rate, low cost	High temperature oxidation
Fluoride	TiF ₃ , CaF ₂ , BaF ₂		
Soft metal	Ag, Au, Pb, Sn, Zn	Oxidation stability, self-adjusting temperature	Rapid diffusion to the surface depletes the metal lubricant coating
Oxide	TiO ₂ , V ₂ O ₅ , PbO, Al ₂ O ₃ , WO ₃ , ZnO, MoO ₃	Low coefficient of friction	Wear occurs at low temperatures
Composite metal oxide	AgVO ₃		
Mixed solid lubricant	WS ₂ +Ag+h-BN, Mo ₂ S+Ag, Mo ₂ S/WS ₂ +Cu, Graphite+ Mo ₂ S	Suitable for wide temperature range, different lubricants have complementary properties	Process complex

Yan 等^[56]在铜表面制备 Co 基合金/TiC/CaF₂ 自润滑涂层,随着 CaF₂ 含量从 0 增加到 20%,涂层组织由枝晶变为颗粒状,显微硬度比纯 Co 基合金约高 2 倍,在 400 °C 干摩擦条件下具有良好的摩擦磨损性能。Li 等^[57]在 35CrMo 钢基体制备 Co 基自润滑涂层,随着 Ti₃SiC₂ 含量从 5% 增加到 15%,平均显微硬度逐步提高,含量为 10% 时涂层耐磨性最高。王港等^[58]在 304 不锈钢基体激光熔覆 Co-Ti₃SiC₂ 自润滑复合涂层,在室温和 600 °C 条件下,硬质相 TiC、Cr₇C₃、Fe₂C 和润滑相 Ti₃SiC₂ 之间协同作用,涂层具有最优的耐磨减摩性能。

固体润滑剂可以在基体表面形成一层薄膜,使涂层具备自润滑性能,降低涂层摩擦系数和磨损率,并起到减摩抗磨的作用。目前,在激光熔覆中主要还是使用单一固体润滑剂,润滑效果在较窄温度区间内较好,未来可以继续研发复合固体润滑剂,以适应宽温度区间环境。

4 复合工艺

在激光熔覆前后增加其他辅助工艺,能较好地改善或消除熔覆缺陷,提升熔覆层性能。常用的辅助工艺有:前预热、热处理、时效处理、超声振动、磁场辅

助等。

Cui 等^[59]采用低温离子硫化处理在 Co 基激光熔覆层上成功制备了硫化层,硫化层中含 FeS 和少量 WS₂ 润滑相,且钴基涂层本身具有较高的硬度和耐腐蚀性能,有利于支撑硫化物润滑膜,最终熔覆层具有较好的减摩耐磨性能和较长的使用寿命。崔岗等^[22]对 410 不锈钢表面熔覆的 Co 基合金涂层进行了高温回火处理,热处理后熔覆层具有较低的摩擦系数,可在较长时间内起到减摩耐磨作用。Ramiro 等^[60]在 42CrMoS4 基体熔覆钴基涂层,然后分析了预热、未预热和硬化(淬火+低温回火)的基体中的不同特性,结果表明,硬化后的基体获得了最佳涂层。权秀敏等^[61]对低碳钢表面制备的 VN/Co 基合金进行了时效处理,处理后相组成没有变化,但随着时效温度增加,硬度和耐磨性均显著提高。徐家乐等^[62-63]利用电磁搅拌和超声振动在 GCr15 轴承钢表面制备钴基合金涂层,结果表明,引入电磁搅拌和超声振动后,涂层晶粒细化,表面形成的氧化膜进一步提升了涂层抗热腐蚀性能和抗高温氧化性。Qi 等^[64]在 42CrMo 基体上制备 Co 基激光熔覆层,熔覆过程中施加磁场,结果表明,磁场可以改善熔覆层的元素分布均匀性,降低元素偏析,从而降低熔覆层的裂纹敏感性。

5 结束语

激光熔覆技术作为目前一种先进的表面改性技术,应用前景十分广阔。本文从激光熔覆主要工艺参数,陶瓷、稀土和固体润滑剂等添加材料,以及其他辅助工艺等方面,对激光熔覆制备钴基合金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)激光熔覆制备钴基合金涂层,激光功率、扫描速度和送粉速率等工艺参数是影响涂层质量和涂层性能的关键因素,合理选择工艺参数有利于制备出无(少)缺陷、性能优良的涂层。

2)在钴基合金粉末中加入硬质陶瓷粉末、稀土和固体润滑剂等添加剂,可以有效提升涂层的力学性能和摩擦学性能。目前研究结果中添加的固体润滑剂在较窄温度区间内润滑效果较好,未来可以继续研发复合固体润滑剂,以适应更宽的温度区间环境。

3)在激光熔覆前后增加预热、热处理等辅助工艺,或者熔覆过程中结合超声振动、磁场辅助等措施,可以有效地改善熔覆质量,减少气孔、裂纹等缺陷,提升涂层使用性能。后续可继续研究多种辅助工艺相结合的技术,进一步提高涂层熔覆质量。

4)目前激光熔覆的研究重点主要集中在涂层微观组织、硬度、耐磨性、耐腐蚀性等方面,而在涂层结合强度、疲劳强度、冲击韧性和高温下的摩擦学性能等方面的研究还比较缺乏,后续可进一步拓宽研究方向,提升激光熔覆工艺可靠性。

参 考 文 献

- [1] 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].表面技术,2020,49(10):1-11.
Zhang J C, Shi S H, Gong Y Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [2] 肖林林,任雁,高秋华,等.浅谈激光熔覆技术研究进展[J].新技术新工艺,2021(7):5-7.
Xiao L L, Ren Y, Gao Q H, et al. Research on progress of laser cladding technology[J]. New Technology & New Process, 2021(7): 5-7.
- [3] Ding L, Hu S S, Quan X M, et al. Effect of VN alloy addition on the microstructure and wear resistance of Co-based alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 659: 8-14.
- [4] Paydas H, Mertens A, Carrus R, et al. Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: influence of building strategy on microstructure and hardness[J]. Materials & Design, 2015, 85: 497-510.
- [5] 陈佩强. Fe-WC 金属陶瓷梯度涂层对合金钢表面组织与性能的影响分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
Chen P Q. Analysis of the effect of Fe-WC cermet gradient coating on the surface microstructure and properties of alloy steel[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [6] Liu X B, Bi J Z, Meng Z Y, et al. Tribological behaviors of high-hardness Co-based amorphous coatings fabricated by laser cladding[J]. Tribology International, 2021, 162: 107142.
- [7] Sui Y Y, Yang F, Qin G L, et al. Microstructure and wear resistance of laser-cladded Ni-based composite coatings on downhole tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 217-224.
- [8] 邱焕霞,俞文斌,宋建丽,等. H13 钢表面激光熔覆 316L/H13+20%WC 复合涂层温度场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0314002.
Qiu H X, Yu W B, Song J L, et al. Numerical simulation of laser cladding 316L/H13+20%WC composite coating on H13 steel surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0314002.
- [9] Zhu L D, Xue P S, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [10] 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.
- [11] 李英,李平.激光熔覆制备抗冲蚀磨损镍基复合涂层的研究进展[J].材料导报,2021,35(15):15162-15168,15174.
Li Y, Li P. Research progress on erosion wear resistant nickel-based composite coatings prepared by laser cladding[J]. Materials Reports, 2021, 35(15): 15162-15168, 15174.
- [12] 张玉杰,杨建华,许玲萍.激光熔覆技术在表面失效机械件中的应用[J].电镀与精饰,2021,43(8):39-43.
Zhang Y J, Yang J H, Xu L P. Application of laser cladding technology in mechanical parts with surface failure[J]. Plating and Finishing, 2021, 43(8): 39-43.
- [13] Erfanmanesh M, Shoja-Razavi R, Abdollah-Pour H, et al. Friction and wear behavior of laser cladded WC-Co and Ni/WC-Co deposits at high temperature[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 137-148.
- [14] Thawari N, Gullipalli C, Chandak A, et al. Influence of laser cladding parameters on distortion, thermal history and melt pool behaviour in multi-layer deposition of stellite 6: *in-situ* measurement[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 860: 157894.
- [15] 张昌春,石岩,王洪新.激光功率对 Co 基梯度耐磨涂层性能的影响[J].激光技术,2018,42(4):494-499.
Zhang C C, Shi Y, Wang H X. Effect of laser power on properties of Co-based gradient wear-resistant coatings [J]. Laser Technology, 2018, 42(4): 494-499.
- [16] 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.
Hu M. Study on the process and mechanism of WC-Co wear-resistant coating on the surface of steel by laser cladding[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [17] 王航,武美萍,陆佩佩,等.激光功率对钴基/GO 复合熔覆层力学性能的影响[J].激光与光电子学进展,2020,57(9):091405.
Wang H, Wu M P, Lu P P, et al. Effect of laser power

- on the mechanical properties of the cobalt-based/GO composite coatings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 091405.
- [18] Bartkowski D, Kinal G. Microstructure and wear resistance of stellite-6/WC MMC coatings produced by laser cladding using Yb:YAG disk laser[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 58: 157-164.
- [19] 叶宏, 喻文新, 雷临萍, 等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层工艺优化及组织性能[J]. *金属热处理*, 2016, 41(12): 117-121.
Ye H, Yu W X, Lei L P, et al. Process optimization of Co-based coating on H13 steel by laser cladding and its microstructure and properties[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(12): 117-121.
- [20] 王涛, 姚有才, 王宁, 等. 激光熔覆钴基合金涂层的组织与耐磨性[J]. *金属热处理*, 2017, 42(5): 84-89.
Wang T, Yao Y C, Wang N, et al. Microstructure and wear resistance of Co-based alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(5): 84-89.
- [21] 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.
He S S. Microstructure and properties of Co-based alloy composite coating on stainless steel surface by laser cladding[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2019.
- [22] 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.
Cui G, Han B, Zhang M K. Study on the process of laser cladding Co-based alloy coating prepared on the surface of stainless steel[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(4): 397-401.
- [23] 阿拉法特·买尔旦, 乌日开西·艾依提, 金济涛. 镍基合金在激光熔覆再制造中的应用研究综述[J]. *机械设计与制造*, 2017(4): 263-265.
Alafate M, Wurikaixi A, Jin J T. A review of the application of nickel-base alloy in laser cladding remanufacturing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(4): 263-265.
- [24] 李根. TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Li G. Microstructure and properties of Co-based alloy laser cladding layer reinforcement by TiC[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [25] Falqueto L E, Butkus D J, De Mello J D B, et al. Sliding wear of cobalt-based alloys used in rolling seamless tubes[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 1739-1746.
- [26] 张猛. 钴基合金激光熔覆工艺参数优化及其性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2021.
Zhang M. Optimization of laser cladding process parameters of cobalt-based alloy and study on its properties[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2021.
- [27] Guo H M, Wang Q, Wang W J, et al. Investigation on wear and damage performance of laser cladding Co-based alloy on single wheel or rail material[J]. *Wear*, 2015, 328/329: 329-337.
- [28] 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.
Cui L J, Zhang M, Cao Y L, et al. Microstructure and properties of cobalt alloy laser cladding layer for pump valve[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(11): 333-340.
- [29] 叶宏, 雷临萍, 喻文新, 等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层组织及热疲劳性能[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(2): 140-144.
Ye H, Lei L P, Yu W X, et al. Microstructure and thermal fatigue resistance of Co-based alloy coating on H13 steel by laser cladding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(2): 140-144.
- [30] Li Z Y, Yan H, Zhang P L, et al. Improving surface resistance to wear and corrosion of nickel-aluminum bronze by laser-clad TaC/Co-based alloy composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126592.
- [31] Quan X M, 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.
- [32] 童文辉, 赵子龙, 张新元, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆 TiC/钴基合金组织和性能研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(4): 472-478.
Tong W H, Zhao Z L, Zhang X Y, et al. Microstructure and properties of TiC/Co-based alloy by laser cladding on the surface of nodular graphite cast iron[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(4): 472-478.
- [33] 孙宁, 方艳, 张家奇, 等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602106.
Sun N, Fang Y, Zhang J Q, et al. Effect of WC-12Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel 625 matrix composites prepared by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602106.
- [34] 胡登文, 刘艳, 陈辉, 等. Q960E 钢激光熔覆 Ni 基 WC 涂层组织及性能[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 060212.
Hu D W, Liu Y, Chen H, et al. Microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC coating on Q960E steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 060212.
- [35] 许苗苗. 钛及钛合金表面激光熔覆 WC-Co 复合涂层的组织及性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
Xu M M. Microstructure and properties of laser cladding WC-Co composite coatings on titanium and titanium alloys[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [36] 潘邻, 高万振, 潘春旭, 等. 碳化钨对钴基合金激光熔覆复合涂层组织、微区成分及硬度的影响[J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(10): 129-135.
Pan L, Gao W Z, Pan C X, et al. Influence of WC on microstructure, compositions of micro-region and microhardness of laser cladding cobalt-based alloy layer[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, 31(10): 129-135.
- [37] 何波, 庄家良, 兰姣姣, 等. 激光熔覆碳化钨/钴基合金

- 复合涂层的组织与耐磨性能[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 314-318.
- He B, Zhuang J L, Lan J J, et al. Microstructure and wear-resistant properties of tungsten carbide/cobalt-based alloys composite coating by laser cladding[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 314-318.
- [38] 李春燕, 寇生中, 赵燕春, 等. 钛合金表面激光熔覆 Co-WC 复合涂层的组织及力学性能[J]. 功能材料, 2015, 46(7): 7025-7029.
- Li C Y, Kou S Z, Zhao Y C, et al. Microstructure and mechanical property of laser cladding Co-WC composite coatings on titanium alloy surface[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(7): 7025-7029.
- [39] Bartkowski D, Młynarczyk A, Piasecki A, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68: 191-201.
- [40] 龚佑品, 鲁玮瑗, 袁晓敏. 激光熔覆 TiB₂ 增强 Co 基合金涂层的组织与性能[J]. 激光技术, 2008, 32(2): 122-124.
- Gong Y P, Lu W Y, Yuan X M. Microstructure and properties of TiB₂ reinforced Co-based alloy coating by laser cladding[J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 122-124.
- [41] 马海波, 张维平. 钛合金表面激光熔覆钴基复合涂层的组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(12): 2189-2192.
- Ma H B, Zhang W P. Microstructure and properties of Co-based alloy laser clad layer on titanium alloy surface [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(12): 2189-2192.
- [42] Weng F, Yu H J, Liu J L, et al. Microstructure and wear property of the Ti₅Si₃/TiC reinforced Co-based coatings fabricated by laser cladding on Ti-6Al-4V[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 156-162.
- [43] 董文辉, 刘玉坤, 赵晨熾, 等. 工艺参数对球墨铸铁表面激光熔覆 (TiC+B₄C)/Co 基合金涂层组织和性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2020, 37(5): 46-54.
- Tong W H, Liu Y K, Zhao C X, et al. The effects of laser cladding parameters on the microstructure and properties of cladding layer of (TiC + B₄C)/Co-based alloy on the surface of ductile iron[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2020, 37(5): 46-54.
- [44] Zhang Y Z, Xu P Q, Liu C G, et al. The influence of carbides on the microstructure, grain growth, and oxidation resistance of nanostructured carbides-strengthened cobalt-based multi-track laser-cladding layers[J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 495-504.
- [45] Liu S S, Wang Y H, Zhang W P. Microstructure and wear resistance of laser clad cobalt-based composite coating on TA15 surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(5): 1041-1046.
- [46] 张春华, 武世奇, 刘凯, 等. 稀土对激光熔覆 Co 基合金组织及性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(5): 492-497.
- Zhang C H, Wu S Q, Liu K, et al. Effect of rare earth on microstructure and properties of Co-based alloy by laser cladding[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(5): 492-497.
- [47] Shi C, Lei J B, Zhou S F, et al. Microstructure and mechanical properties of carbon fibers strengthened Ni-based coatings by laser cladding: the effect of carbon fiber contents[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 146-155.
- [48] Lu D H, Liu S S, Zhang X Y, et al. Effect of Y₂O₃ on microstructural characteristics and wear resistance of cobalt-based composite coatings produced on TA15 titanium alloy surface by laser cladding[J]. Surface and Interface Analysis, 2015, 47(2): 239-244.
- [49] Weng F, Yu H J, Chen C Z, et al. Microstructures and properties of TiN reinforced Co-based composite coatings modified with Y₂O₃ by laser cladding on Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 178-184.
- [50] 杨尚磊, 尤加强, 张冬梅, 等. Ni 基合金基体激光熔覆 Co 基合金涂层的微观组织与性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(3): 130-133.
- Yang S L, You J Q, Zhang D M, et al. Microstructure and properties of Co-based alloy laser cladding on Ni-based alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(3): 130-133.
- [51] 李志远, 赵伟毅, 古文全, 等. Ti 对 Co 基合金激光熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2086-2090.
- Li Z Y, Zhao W Y, Gu W Q, et al. Effect of Ti on microstructure and properties of Co-based alloy coating by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2086-2090.
- [52] Farnia A, Malek Ghaini F, Rao J C, et al. Effect of Ta on the microstructure and hardness of Stellite 6 coating deposited by low power pulse laser treatments[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 213: 278-284.
- [53] Voevodin A A, Muratore C, Aouadi S M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: review[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 257: 247-265.
- [54] 王志文, 庄宿国, 刘海青, 等. 激光熔覆自润滑复合涂层研究进展及发展趋势[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 104-112.
- Wang Z W, Zhuang S G, Liu H Q, et al. Research progress and development trend of self-lubricating composite coatings by laser cladding[J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 104-112.
- [55] 孟祥军, 刘海青, 刘秀波. 固体润滑剂在激光熔覆中的应用[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 539-546.
- Meng X J, Liu H Q, Liu X B. The solid lubricating materials in the application of laser cladding[J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 539-546.
- [56] Yan H, Zhang J, Zhang P L, et al. Laser cladding of Co-based alloy/TiC/CaF₂ self-lubricating composite coatings on copper for continuous casting mold[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 232: 362-369.
- [57] Li X, Zhang C H, Zhang S, et al. Manufacturing of

- Ti₃SiC₂ lubricated Co-based alloy coatings using laser cladding technology[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 209-215.
- [58] 王港, 刘秀波, 刘一帆, 等. 304 不锈钢激光熔覆 Co-Ti₃SiC₂ 自润滑复合涂层微观组织与摩擦学性能[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 105-115.
- Wang G, Liu X B, Liu Y F, et al. Microstructure and tribological properties of Co-Ti₃SiC₂ self-lubricating composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 105-115.
- [59] Cui G, Han B, Zhao J B, et al. Comparative study on tribological properties of the sulfurizing layers on Fe, Ni and Co based laser cladding coatings[J]. Tribology International, 2019, 134: 36-49.
- [60] Ramiro P, Alberdi A, Ortiz M, et al. Characteristics of Fe-, Ni- and Co-based Powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 381-386.
- [61] 权秀敏, 丁林, 刘荣富, 等. 时效处理对 VN 合金/Co 基熔覆层组织和性能影响[J]. 铸造, 2015, 64(3): 269-272, 275.
- Quan X M, Ding L, Liu R F, et al. Effect of aging treatment on microstructure and wear resistance of VN alloy/Co-based alloy laser coating[J]. Foundry, 2015, 64 (3): 269-272, 275.
- [62] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能[J]. 光学学报, 2019, 39 (1): 0114002.
- Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Thermal corrosion resistance of Co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114002.
- [63] 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): 0102006.
- Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102006.
- [64] 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.