

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.08.009

激光熔覆技术在表面失效机械件中的应用

张玉杰, 杨建华, 许玲萍

(烟台职业学院 机械工程系, 山东 烟台 264670)

摘要: 阐述了激光熔覆的技术原理和系统的结构, 重点介绍了激光熔覆技术在耐磨损和耐腐蚀方面的研究进展, 总结了磨损失效和腐蚀失效机械件的修复再制造的具体应用, 分析了激光熔覆技术在失效机械件修复再制造应用的可行性和先进性, 展望了激光熔覆技术在失效机械件上的应用前景。

关键词: 激光熔覆; 耐腐蚀; 耐磨损; 修复再制造

中图分类号: TG17、TH17 **文献标识码:** A

Application of Laser Cladding Technology in Mechanical Parts with Surface Failure

ZHANG Yujie, YANG Jianhua, XU lingping

(Department of mechanical engineering, Yantai Vocational College, Yantai 264670, China)

Abstract: The technical principle of laser cladding and the structure of laser cladding system were described. The research progress of laser cladding technology in wear resistance and corrosion resistance was introduced, and the specific application of remanufacturing of mechanical parts with wear failure and corrosion failure was summarized. The feasibility and advanced nature of laser cladding technology in repairing and remanufacturing of failed mechanical parts were analyzed, and the application prospect of the technology in the failure mechanical parts was prospected.

Keywords: laser cladding; wear resistance; corrosion resistance; repair and remanufacturing

磨损、腐蚀以及断裂是金属材料三大失效形式,也是造成金属机械部件失效报废的重要因素。为了对腐蚀或磨损失效后的机械件进行修复使其恢复原有性能或者避免磨损或者腐蚀造成的金属部件提前失效报废,目前常用热喷涂、冷喷涂、电镀、PVD、CVD、表面堆焊等技术对机械件表面进行处理,以期失效机械件进行再使用并减少或延缓金属表面的磨损或腐蚀^[1,2]。随着激光增材制造技术的不断发展和完善,激光熔覆技术逐渐应用于金属机械部件表面的处理,延长机械部件的使用寿命。

激光熔覆技术采用激光作为热源,将功能性金

属材料加热熔化后沉积在同时经激光辐照熔化的金属表面,形成一种功能保护层的先进制造技术^[3]。由于功能性金属材料与金属基体表面是经熔化后结合在一起的,二者之间形成了冶金结合,所以激光熔覆形成的熔覆层可以无限次的累积叠加,决定了激光熔覆技术可以制备大厚度的功能层,在磨损、腐蚀失效的机械部件具有重要的应用价值。

本文介绍了激光熔覆技术的工作原理及系统结构,概述了激光熔覆层的耐磨性和耐腐蚀性研究进展,总结了激光熔覆技术在修复再制造磨损失效机械部件、腐蚀失效机械部件上的应用现状,阐述了激

收稿日期: 2020-08-08

修回日期: 2020-09-27

作者简介: 张玉杰,女,副教授,硕士, Email: zyjt_70@163.com

基金项目: 烟台市重点研发计划(2018XSCC036);山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJB001)

光熔覆技术在失效机械部件上应用的可行性和先进性。

1 激光熔覆技术及装备

1.1 激光熔覆技术

激光熔覆技术需要足够的热量将金属填料和基材表面熔化,所以需要大功率的激光器。虽然早在1960年激光器就已经问世,但是直到20世纪70年代制造出大功率激光器,激光熔覆技术才获得了应用并迅速发展^[8]。目前常用的金属填料为金属粉末和金属丝材,根据粉末或丝材填料方式的不同,激光熔覆分为同轴送粉、旁轴送粉、同轴送丝、旁轴送丝以及预铺金属粉末等技术。图1所示为同轴送粉激光熔覆技术,激光首先辐射照到粉末束然后少量激光穿过粉末束照到基材表面,粉末束吸收了大部分激光而熔融彻底,不会造成熔覆层出现气孔、未熔等缺陷,基材吸收激光较少,热影响较小不易发生变形等缺陷。同时,金属粉末束与激光束的走向相同,易于进行控制,对于型面复杂的机械部件易于通过CAD驱动进行自动化生产^[4]。正是由于以上因素,目前同轴送粉成为了激光熔覆技术的主要应用形式,并且一般采用“粉包光”(激光束在内,金属粉末在外)的形式。为了进一步提高金属粉末的利用率以及提高激光熔覆成型的质量,近年来苏州大学的研究人员还开发出了“光包粉”(激光束在外,金属粉末在内)的光内同轴送粉激光熔覆技术^[5-6]。

1.2 同轴送粉激光熔覆装备

如图1所示,激光熔覆装备一般由激光器、送粉器、激光熔覆头、机床、控制系统以及冷却系统等组成^[7]。其中激光器和送粉器是整个装备中的核心部件,激光器激光的稳定性以及送粉器送粉的稳定性对激光熔覆的质量起着决定性的作用。常用的激光器以进口为主,国产激光器近年来也有了较大的发展,但是大功率激光器在稳定性方面与进口产品还存在着不小的差距,送粉器则是沿用技术比较成熟的热喷涂使用的送粉器。

国内常用的激光熔覆设备主要分为两种形式:一是以工业机器人作为运动载体控制激光熔覆头进行运动,并附加第四轴组成的激光熔覆设备,这也是目前最为常见的激光熔覆装备,这种形式的激光熔覆装备控制灵活,对型面较为复杂的机械件适应性较强。另外一种是采用龙门框架结构的机床作为运

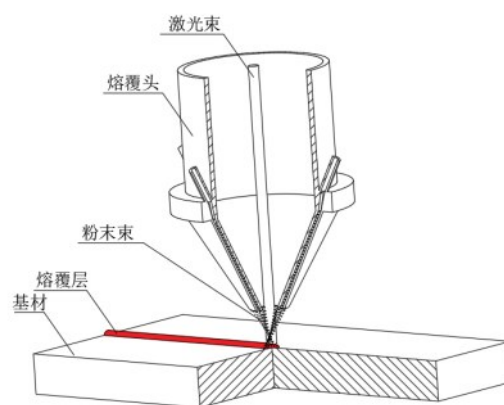


图1 “粉包光”同轴送粉激光熔覆

Fig.1 laser cladding of coaxial powder outside the laser

动载体控制激光熔覆头进行运动,这种装备的精度高,但是制造成本也较高。

2 激光熔覆技术在磨损机械件的应用

2.1 激光熔覆层耐磨性研究

激光熔覆是以高能激光束辐射金属粉末使其瞬间熔化后沉积在室温下的基材上,在较大过冷度的条件下,熔融液滴快速冷却凝固,形成的晶粒细小,并且熔覆层内部组织致密,不存在气孔等缺陷,决定了熔覆层具有优异的性能^[8]。大量研究文献表明^[9-10],激光熔覆层以树枝晶、柱状晶、等轴晶以及平面晶为主,并且晶粒细小,硬度较高。

张磊等^[11]采用同轴送粉激光熔覆技术研究了45钢表面Fe-Mo-V-C合金熔覆层的摩擦磨损性能,分析表明,激光熔覆层致密、晶粒细小,并且合金元素与碳形成的碳化物硬质颗粒均匀分布在铁基合金相中,熔覆层在硬质颗粒“弥散强化”的作用下,显微硬度超过了1000HV_{0.2},并且在磨损过程中,硬质颗粒的“扎钉”以及“抗磨骨架”作用,大幅提高了熔覆层的耐磨性。Zhang等^[12]采用激光熔覆技术在45钢表面制备了(NiCoCrTi_{0.5}Nb_{0.5})C_x高熵合金熔覆层并采用OM和SEM技术检测了高熵合金熔覆层的微观组织,熔覆层主要以(Ti,Nb)C、Cr₃C₂碳化物为主,当C含量为6%时,熔覆层的耐磨性达到最优,证明了激光熔覆技术在制造工具、模具和机械零件上应用的可行性。朱福栋等^[13]研究了45钢表面Co/WC增强Ni基复合激光熔覆层的微观组织、成分分布、硬度以及耐磨性,结果表明熔覆层内部以柱状晶和

树枝晶为主,在高功率下,WC存在一定的溶解,熔覆层硬度跟WC的分布均匀性和溶解量有关。

研究人员在合金钢表面也开展了激光熔覆层的耐磨性研究。Qin等^[14]在18Cr2Ni4WA合金钢表面制备了高钴镍二次硬化合金钢熔覆层,研究发现,微量的CeO₂可以减少WC在高温下的分解,并且有效抑制裂纹的产生和扩展,进一步细化了晶粒,对提高熔覆层的耐磨性十分有益。Liu^[15]等采用IPG光纤激光器在30CrNiMo基体上制备了Co06耐高温磨损熔覆层,研究表明,熔覆层内部组织以平面晶、柱状晶、树枝晶和等轴晶为主,熔覆层在600℃高温下的耐磨性和抗氧化性能均优于基体材料,并且熔覆层内部的Cr₂₃C₆等碳化物具有显著的减磨作用,对提高高速列车制动盘的耐磨性非常有利。

2.2 激光熔覆在磨损失效机械件上的应用

磨损是机械部件常见的失效形式之一,资料显示,每年由于磨损导致的机械件报废占机械件报废总量的50%左右。激光熔覆层具备优异的耐磨性能,并且激光熔覆过程中对基材的热影响较小,不会造成磨损零件原有机件性能的改变以及机械部件的变形,在冶金机械、矿山机械、油田以及煤矿设备磨损机械件的修复上近年来得到了十分广泛的应用。

白新波^[16]采用激光熔覆技术成功进行了宝钢冷轧连退机组失效的支撑辊辊颈的修复再制造,结果表明,修复后的支撑辊表面没有裂纹、气孔等缺陷,修复后的支撑辊满足使用要求。这为磨损报废失效支撑辊的再使用提供了新的技术方案,实现了支撑辊的全寿命使用。王运喜等^[17]采用激光熔覆技术对核电厂的上充泵转子进行了修复,结果表明经激光熔覆修复的上充泵转子使用1.5 a后仍正常运行,没有发生由于转子问题而产生的振动或轴承温度升高等异常现象,解决了上充泵转子磨损后直接报废无法再利用的难题。程建峰^[18]对矿用卡车电动轮Q235钢主轴磨损面进行了激光熔覆修复,修复表面成型良好、无气孔、无裂纹等缺陷,修复后的性能达到了电动轮主轴使用的力学性能指标,实现了矿用卡车电动轮磨损失效主轴的修复再制造,延长了电动轮的使用寿命。

3 激光熔覆技术在易腐蚀机械件的应用

3.1 激光熔覆层耐腐蚀性研究

常见的金属腐蚀分为均匀腐蚀、晶间腐蚀、点腐

蚀以及应力腐蚀等。激光熔覆作为一种新型的表面处理技术在均匀腐蚀和点腐蚀表面起着重要的作用。

朱成才等^[19]以45钢为基材研究了Ni基复合激光熔覆层的耐腐蚀性能,结果表明,激光熔覆Ni-TiC-Cr层可以显著提高45钢的耐腐蚀性能。研究认为TiC的加入可以起到类钝化膜的作用,Cr元素可以促进试样形成稳定致密的钝化膜,并且随着TiC和Cr含量的增加,激光熔覆层的抗点蚀能力得到了明显的提高,在静态3.5% NaCl溶液腐蚀试验中,Ni-50TiC-20Cr熔覆层的耐点蚀能力达到了最优,没有出现明显的点蚀坑。郭岩等^[20]在H13钢表面成功制备了WC增强镍基和铁基复合激光熔覆合金层,合金层内部组织致密,WC颗粒分布均匀,起到了优异的弥散强化作用。经盐雾腐蚀试验,激光熔覆H13粉末/20%碳化钨的耐腐蚀性能最优,研究认为弥散分布的碳化物颗粒有助于提高耐盐雾腐蚀性能。

鲍亚运等^[21]研究了低合金钢Q345表面FeCr-NiCoCuAl_x($x=0,1,2,3$)高熵合金激光熔覆层的耐腐蚀及耐冲蚀性能,结果表明,Al的添加使得熔覆层在3.5% NaCl溶液中生成了钝化膜,提高了高熵合金熔覆层的耐蚀性。陈坚等^[22]研究了不同镍含量的铁基激光熔覆层的耐腐蚀性能,电化学测试和盐雾试验测试结果表明,控制镍含量可使激光熔覆铁基合金层具有较好的耐腐蚀能力,并可以应用于液压支柱的修复再制造。

3.2 激光熔覆在腐蚀失效机械件上的应用

腐蚀是金属机械件失效的另一个重要因素,据不完全统计,全球每年有超过30%以上的报废钢铁是由于腐蚀问题造成的,我国每年由于腐蚀造成的经济损失超过2万亿人民币。

轧机是轧钢厂主要的生产设备之一,轧机处于冷却水与高温水蒸气的交替循环的环境中,受到双重腐蚀作用,在使用一段时间后就会发生严重腐蚀。南京钢铁公司^[23]采用激光熔覆技术在腐蚀过的轧机表面制备耐腐蚀层,现场实际应用表明激光熔覆层具有优异的耐腐蚀性能,证明激光熔覆技术在钢铁冶金部件的耐磨耐腐蚀方面具有较高的实用价值。

肖洁等^[24]研究了采煤机高速轴激光熔覆WC增强镍基合金复合层的耐腐蚀性,测试结果表明激光

熔覆技术制备的镍基合金层的耐腐蚀性优于目前常用的电镀法和阴极保护法,充分说明了激光熔覆方法在修复腐蚀的采煤机高速轴上应用的可能性和先进性。其它研究人员^[25-27]研究了激光熔覆技术修复煤矿用液压支架的可行性,研究结果表明激光熔覆技术可以替代目前液压支架立柱表面镀铬技术,采用该技术修复腐蚀失效的液压支架能够有效延长液压支架的使用寿命,在煤矿开采行业具有十分显著的社会效益和经济效益。

4 结论与展望

随着大功率激光器的出现和不断完善,激光熔覆技术作为一种先进的表面处理技术和增材制造技术越来越受研究人员和技术人员的青睐和重视。激光熔覆层与基材之间为冶金结合,解决了热喷涂、电镀、冷喷涂等修复件在使用过程中易发生剥落的情况。熔覆层内部组织致密、晶粒细小,具有优异的耐磨性和耐腐蚀性,可以提高修复再制造零件的使用寿命。并且激光熔覆采用高能激光束,热量利用率高,不易造成机械件本体的变形和原有性能的改变,适于机械件的修复再制造,具有十分广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Cui L J, Cao Y L, Zeng W H, et al. Laser cladding Fe-base alloy coatings structure for marine hydraulic column [J]. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11, 854-861.
- [2] Samar R A A, Abdel H A H, Adel A M S, et al. Laser powder cladding of Ti-6Al-4V α/β alloy[J]. *Materials*, 2017, 10, 1178-1193.
- [3] Yu T B, Bao Y T. Research on manufacturing technology of thin-walled parts of Fe105 metal based on laser cladding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1187(3): 32-43.
- [4] Jim F, Crawford C, Stephen F, et al. Remanufacture of hot forging tools and dies using laser metal deposition with powder and a hard-facing alloy stellite [J]. *Journal of Remanufacturing*, 2019, 9, 189-203.
- [5] 张津超,石拓,李刚,等. 开放环境下激光内送粉熔覆 TC4 钛合金的氧化行为[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 243-251.
Zhang J C, Shi T, Li G, et al. Oxidation of TC4 titanium alloy processed by laser inside powderfeeding technology in open environment[J]. *Surface Technology*, 2020, 49 (2): 243-251 (in Chinese).
- [6] Zhu G X, Shi S H, Fu G Y, et al. The influence of the substrate-inclined angle on the section size of laser cladding layers based on robot with the inside-beam powder feeding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88, 2163-2168.
- [7] Zhu L D, Wang S H, Pan H C, et al. Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49, 344-354.
- [8] 魏铭. 稀土氧化物 CeO₂ 对 H13 钢激光熔覆钴基合金组织和性能的影响[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] 王贤才, 张亚普, 柴蓉霞. 27SiMn 钢表面激光熔覆 304 不锈钢的组织 and 性能[J]. *金属热处理*, 2020, 45(4): 188-193.
Wang X C, Zhang Y P, Chai R X. Microstructure and properties of 304 stainless steel laser cladding on 27SiMn steel surface[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(4): 188-193 (in Chinese).
- [10] Li K B, Dong L, Liu D Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 340, 143-150.
- [11] 张磊, 陈小明, 苏建源, 等. 激光熔覆 Fe-Mo-V-C 合金涂层组织及摩擦磨损性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2020, 25(1): 65-71.
Zhang L, Chen X M, Su J H, et al. Microstructure and frictional wear performance of Fe-Mo-V-C alloy coating prepared by laser cladding[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2020, 25(1): 65-71 (in Chinese).
- [12] Zhang Y, Han T F, Xiao M, et al. Preparation of diamond reinforced NiCoCrTi_{0.5}Nb_{0.5} high-entropy alloy coating by laser cladding: Microstructure and wear behavior[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29, 1827-1837.
- [13] 朱福栋, 朱必云, 马长平. 激光增材制造 Co/WC 增强 Ni 基复合涂层的组织与耐磨性能[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(9): 142-148.
Zhu F D, Zhu B Y, Ma C P. Microstructure and wear resistance of Co/WC enhanced Ni-based composite coating by laser additive manufacturing[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(9): 142-148 (in Chinese).
- [14] Qin R Y, Zhang X J, Guo S Q, et al. Laser cladding of

- high Co-Ni secondary hardening steel on 18Cr2Ni4WA steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 285, 242-248.
- [15] Liu Y, Wu Y, Ma Y M, et al. High temperature wear performance of laser cladding Co06 coating on high-speed train brake disc[J]. Applied Surface Science, 2019, 481, 761-766.
- [16] 白新波. 宝钢连退支撑辊辊颈激光熔覆修复工艺研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 81-83.
- Bai X B. Study on laser cladding repair technology of roller neck of continuous annealing support roller in Bao-steel[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 81-83 (in Chinese).
- [17] 王运喜, 韩超. 利用激光熔覆技术修复核电厂上充泵转子[J]. 电力安全技术, 2020, 22(1): 68-73.
- Wang Y X, Han C. Repair of the charging pump rotor with laser cladding technique in nuclear power plant[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(1): 68-73 (in Chinese).
- [18] 程建峰. MT5500卡车进口电动轮激光表面熔敷修复工艺研究[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(6): 87-91.
- Cheng J F. Research on MT5500 truck electric wheels laser cladding repair process[J]. Opencast Mining Technology, 2018, 33(6): 87-91 (in Chinese).
- [19] 朱成才, 张自强, 白海明, 等. 激光熔覆 Ni-TiC-Cr 涂层的耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2020, 53(3): 71-77.
- Zhu C C, Zhang Z Q, Bai H M, et al. Corrosion resistance of Ni-TiC-Cr coating prepared by laser cladding [J]. Materials Protection, 2020, 53(3): 71-77 (in Chinese).
- [20] 郭岩, 叶智, 杨文涛, 等. 含碳化钨的镍基和铁基合金激光熔覆层的组织结构与耐盐雾腐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2019, 38(19): 1054-1059.
- Guo Y, Ye Z, Yang W T. Microstructure and salt spray corrosion resistance of laser-clad nickel-based and iron-based layers containing tungsten carbide[J]. Electropolishing & Finishing, 2019, 38(19): 1054-1059 (in Chinese).
- [21] 鲍亚运, 纪秀林, 姬翠翠, 等. 激光熔覆 FeCrNiCoCuAl_x 高熵合金涂层的耐腐蚀与抗冲蚀性能[J]. 材料工程, 2019, 47(11): 141-147.
- Bao Ya Y, Ji X L, Ji C C, et al. Corrosion and slurry erosion properties of FeCrNiCoCuAl_x high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(11): 141-147 (in Chinese).
- [22] 陈坚, 胡碧康, 吴贺利, 等. 激光熔覆铁基合金粉末的组织及耐蚀性能[J]. 材料保护, 2019, 52(12): 150-153.
- Chen J, Hu B K, Wu H L, et al. Structure and corrosion resistance of laser cladding Fe-based alloys[J]. Materials Protection, 2019, 52(12): 150-153 (in Chinese).
- [23] 吴小树. 轧机牌坊现场防腐激光熔覆的应用[C]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集, 2015.
- [24] 肖洁, 丁涛. 基于激光熔覆的采煤机高速轴耐蚀性能研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(4): 130-135.
- Xiao J, Ding T. Study on high speed shaft corrosion resistance of axle based on laser cladding [J]. Laser Journal, 2020, 41(4): 130-135 (in Chinese).
- [25] 黎文强, 马宗彬, 丁紫阳. 基于激光熔覆技术的矿用液压支架修复[J]. 煤矿机械, 2016, 37(11): 122-123.
- Li W Q, Ma Z B, Ding Z Y. Mine hydraulic support repair based on laser cladding technology [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(11): 122-123 (in Chinese).
- [26] 付祖冈, 张自强, 孟贺超, 等. 激光熔覆技术在高腐蚀环境下液压支架的实验研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 155-160.
- Fu Z G, Zhang Z Q, Meng H C, et al. Experimental study of laser cladding technology for hydraulic support in high corrosive environment[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 155-160 (in Chinese).
- [27] 栗卓新, 丁卫东, 李国栋, 等. 液压支架立柱活塞杆表面修复工艺的现状与进展[J]. 煤炭技术, 2014, 33(10): 187-190.
- Li Z X, Ding W D, Li G D, et al. Current situation and progress of reparation process for hydraulic support piston rod[J]. Coal Technology, 2014, 33(10): 187-190 (in Chinese).