



裕溪船闸闸门底枢蘑菇头和轴的激光熔覆试验研究

张晓辉¹, 蔡建国¹, 戴振华², 卢昌福³, 王占华⁴

(1. 东南大学, 国家预应力工程技术研究中心, 江苏南京 210096;
2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014; 3. 常州液压成套设备厂有限公司, 江苏常州 213161;
4. 水利部水工金属结构质量检验测试中心, 河南郑州 450044)

摘要: 以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34 m 口门三角闸门的底枢蘑菇头和轴为研究对象, 从宏观金相、微观组织、X 射线衍射仪、硬度计检测熔覆层的表面硬度以及盐雾试验机测试试件的耐腐蚀性等方面, 对不同的基体材料和激光熔覆粉末进行试验对比研究。结果表明: Ni40 粉末和 Co40 粉末都具有较高的硬度和优良的耐腐蚀性能, 满足底枢蘑菇头和轴激光熔覆的性能要求。Fe40 和其他 2 种材料相比, 在各种性能上都存在差异, 不适合用作激光熔覆粉末。

关键词: 三角闸门; 激光熔覆; 基体; 熔覆材料

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0017-07

Experimental research on mushroom head and shaft of Yuxi lock gate's bottom pivot by laser cladding

ZHANG Xiao-hui¹, CAI Jian-guo¹, DAI Zhen-hua², LU Chang-fu³, WANG Zhan-hua⁴

(1. Southeast University, National Prestress Engineering Research Center, Nanjing 210096, China;
2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;
3. Changzhou Hydraulic Complete Equipment Factory Co., Ltd., Changzhou 213161, China;
4. National Center of Quality Inspection & Testing for Hydro Steel Structure Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Taking the bottom pivot's mushroom head and shaft of 34 m-entrance wedge gate in Yuxi first-line ship lock expansion and reconstruction project as a study case, we carry out comparative research on different base materials and laser cladding powders from the macroscopic metallography, microstructure, X-ray diffractometer, the surface hardness of the cladding layer, and the corrosion resistance of the specimen tested by the salt spray test machine. The results show that Ni40 powder and Co40 powder have high hardness and excellent corrosion resistance, which can meet the performance requirements of laser cladding. Compared with the other two materials, Fe40 has different properties and is not suitable for laser cladding powder.

Keywords: wedge gate; laser cladding; substrate; cladding material

船闸底枢蘑菇头和轴长期处于重载、低速的工作状态, 启动频繁, 摩擦副的接触界面之间难以形成有效的润滑油膜, 从而导致摩擦副提前失效, 且工作环境易造成运转件锈蚀。这些直接影响了阀门的平稳运行, 由此造成的频繁检修给船

闸管理带来不便^[1-2]。传统的运转件表面强化工艺淬火、镀铬、渗氮处理等均未取得理想效果。激光熔覆技术以激光为热源, 将填充材料和基材表面一起熔凝, 在基材表面形成与其冶金结合的熔覆层, 从而显著改善其表面耐磨、耐蚀、耐热及

抗氧化等性能。随着大功率激光设备的成熟和材料科学的发展,激光熔覆技术已在多个行业领域中进行应用并取得良好的使用效果^[3-5]。由于激光熔覆的复杂性,对激光熔覆成形组织的研究主要以试验研究为主^[6-9]。

目前,激光熔覆技术在水运工程领域的应用尚处于起步阶段。本文以裕溪一线船闸扩容改造工程中34 m口门三角闸门的底枢蘑菇头和轴为研究对象,选择不同的基体材料和激光熔覆粉末,从低倍显微镜分析熔覆层宏观金相、扫描电子显微镜分析熔覆层和热影响区的微观组织、X射线衍射仪分析其衍射图谱和相组成、硬度计检测熔覆层的表面硬度、盐雾试验机测试试件的耐腐蚀性几个方面进行试验对比研究,确定适合船闸底枢蘑菇头和轴的激光熔覆材料。

1 激光熔覆试验试件制作

分别采用常用并易于获取的35、45和40Cr钢作为基体材料,采用耐磨、防腐,并具有抗冲击性能的Ni40、Co40、Fe40的激光熔覆粉末用于试验研究。

激光熔覆试验的单个试板尺寸为350 mm×150 mm×30 mm,35、45和40Cr钢各准备3件。按照试板和熔覆粉末正交的结果,需要进行9组试板的激光熔覆,工艺参数见表1。铣加工试板的待熔覆表面的粗糙度至3.2 μm。

表1 激光熔覆工艺参数

基材	粉末	预热温度/ °C	激光功率/ kW	扫描速度/ (mm·min ⁻¹)	送粉速度/ (g·min ⁻¹)
35					
45	Ni40	250	7.0		
40Cr					
35					
45	Co40	150	6.5	420	100
40Cr					
35					
45	Fe40	400	6.2		
40Cr					

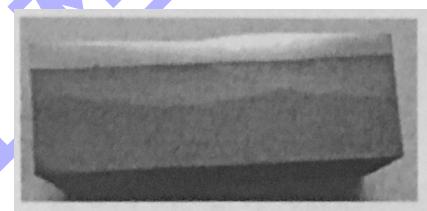
2 激光熔覆试验分析

为了研究熔覆层的质量和使用性能,针对不同基材和粉末材料制作试件,对各分组试件分别

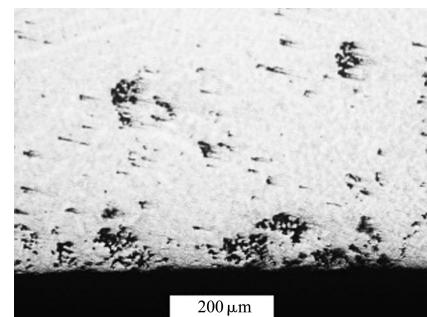
进行相关试验,主要包括采用低倍显微镜分析熔覆层宏观金相,采用扫描电子显微镜分析熔覆层和热影响区的微观组织,采用X射线衍射仪分析其衍射图谱和相组成,采用硬度计检测熔覆层的表面硬度,采用盐雾试验机测试试件的耐腐蚀性。

2.1 宏观金相试验分析

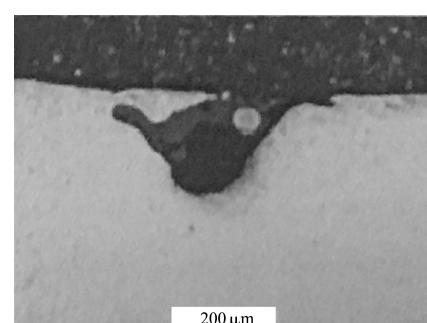
宏观金相检验是在低倍显微镜下检查宏观试样截面的熔覆层和热影响区是否存在裂纹、未熔合、气孔、夹渣等缺陷。以35-Ni40试样为例,图1a)包含试样所有熔覆层和基材的形貌;在显微镜下观察,熔覆层存在疏松缺陷,形貌见图1b);在界面附近的熔覆层侧发现一处夹渣和气孔的混合缺陷,长约450 μm,如图1c)所示。其余试样在低倍显微镜下的宏观金相组织见表2。



a) 宏观照片



b) 疏松



c) 气孔

图1 35-Ni40试样低倍形貌及缺陷形貌

表 2 试样宏观金相检验

试样	试验结果
35-Ni40	熔覆层存在疏松缺陷, 在界面附近的熔覆层侧发现 1 处夹渣和气孔的混合缺陷, 长约 450 μm
45-Ni40	熔覆层存在疏松缺陷, 熔覆层观察到气孔缺陷, 最大气孔直径约 42 μm
40Cr-Ni40	熔覆层存在疏松缺陷, 熔覆层观察到气孔缺陷, 最大气孔直径约 64 μm
35-Co40	未发现缺陷
45-Co40	在界面附近的熔覆层侧发现 2 处气孔缺陷, 最大气孔直径约 170 μm
40Cr-Co40	在界面附近的熔覆层侧发现 3 处气孔缺陷, 最大气孔直径约 75 μm ; 熔覆层观察到气孔缺陷, 最大气孔直径约 66 μm
35-Fe40	发现 1 条长约 358 μm 的裂纹; 在界面附近的熔覆层侧发现 3 处夹渣和气孔的混合缺陷, 最长约 120 μm
45-Fe40	发现 1 条长约 428 μm 和 1 条长约 527 μm 的裂纹; 在界面附近的熔覆层侧发现 1 处气孔缺陷, 气孔直径约 183 μm
40Cr-Fe40	发现裂纹群, 其中裂纹最长约 1 483 μm ; 在界面附近的熔覆层侧发现 2 处夹渣和气孔的聚集缺陷, 最长约 215 μm

由表 2 可知, Ni40 和 Co40 粉末激光熔覆层有一些极其微小的显微缺陷, 这是由于激光熔覆粉末的冶金和凝固是一个复杂的过程。Fe40 粉末激光熔覆层存在裂纹和气孔缺陷。裂纹会导致产品破断和失效, 是最忌讳的一种缺陷形态。

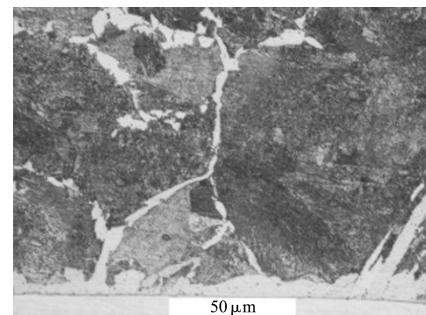
总体上, 激光熔覆无法完全避免显微缺陷, 极个别的显微缺陷, 如气孔和疏松可以接受, 但不能存在裂纹。可以通过以下方法减小这些显微缺陷: 1) 激光熔覆前清除基材表面的氧化层、油污等影响激光熔覆的杂质, 直至全部露出金属光泽; 2) 严格防止合金粉末储运中受潮和氧化, 在使用前进行烘干; 3) 选择合理的激光熔覆工艺参数, 适当降低扫描速度; 4) 合适的预热温度可以降低激光熔覆层的温度梯度, 改善熔覆层的应力状况。

2.2 微观金相试验分析

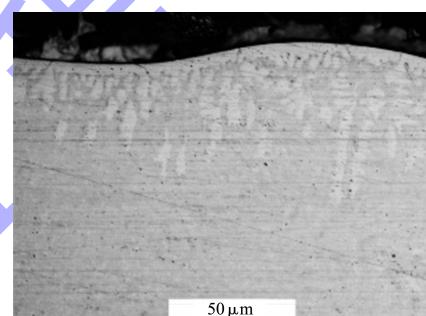
微观金相指使用扫描电子显微镜观察熔覆层、热影响区的微观组织, 其中熔覆层观察底部、中部和顶部组织。

以 45-Fe40 试样为例, 其试样的微观金相组织如图 2 所示。Fe40 粉末激光熔覆在 45 基材上的热影响区组织为珠光体+网状铁素体。Fe40 粉末激光熔覆层底部组织与 Ni40、Co40 相似, 主要有平

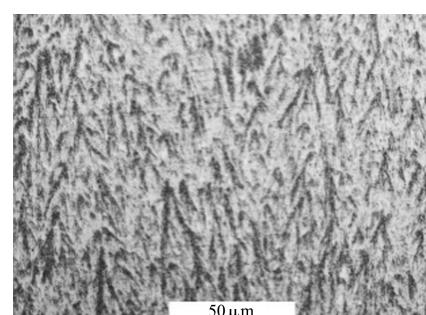
面晶、胞状晶、胞状树枝晶、柱状树枝晶等。而在中部和顶部的形貌则不相同, 主要有 γ -Fe、马氏体组织和一些碳化物, 形成了复杂的金相外观形貌。同时, 在金相组织中能发现细小的微孔和微裂纹, 这也是 Fe40 粉末熔覆时开裂的一个主要原因。



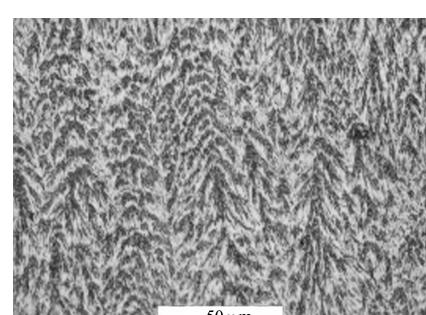
a) 热影响区



b) 熔覆层底部



c) 熔覆层中部



d) 熔覆层顶部

图 2 45-Fe40 试样金相组织

在试验中发现, 同种粉末在不同基材的激光熔覆层的金相组织是相同的, 说明激光熔覆的稀释率很小, 熔覆层的化学成分基本没有受到基材元素熔合的影响。在基材中, 基本没有发现淬火和过热组织, 说明激光熔覆热量很集中, 并且快速熔化和凝固的过程导致基材的热影响区很小。同种基材在熔覆不同粉末的热影响区组织不同, 这主要是因为激光熔覆使用的工艺参数和预热温度, 热影响区的热循环及冷却速度不同导致的。

2.3 硬度试验分析

洛氏硬度分析: 将熔覆层打磨或加工至 1 mm 厚度时, 进行洛氏硬度测试, 每个试样均布测试 3 点。

由图 3 可知, 同种粉末激光熔覆层匹配不同基材的硬度值相差很小。Fe40 和其他 2 种材料相比熔覆层的硬度最小。

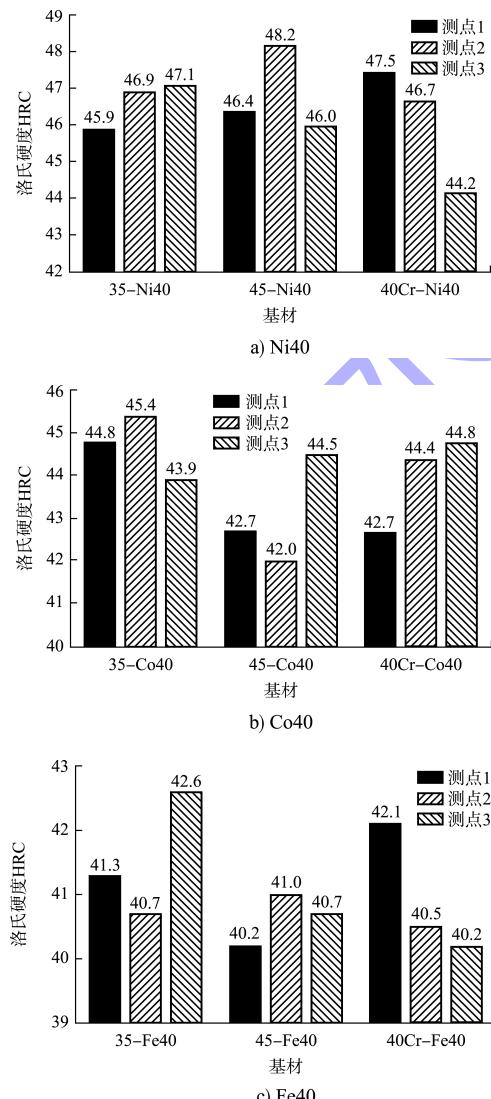


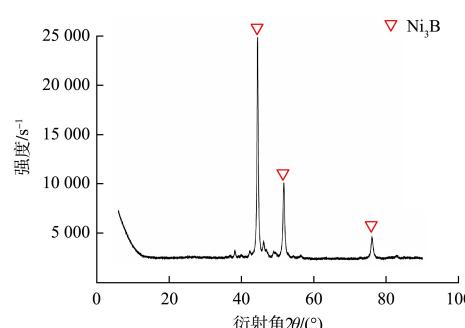
图 3 匹配不同基材的同种粉末激光熔覆层洛氏硬度

2.4 X 射线衍射结果与分析

通过对材料进行 X 射线衍射, 分析其衍射图谱, 获得材料的物相成分。本试验采用德国 BRUKER 公司 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪。试验条件为辐射 Cu 靶, 电压 40 kV, 电流 40 mA, LynxEye 固体探测器, 扫描速度 3°/min。

分别对每个激光熔覆试样进行 X 射线衍射分析, 获得各试样的物相成分。以 Ni40 粉末激光熔覆层的物相进行说明, 如图 4 所示。由图谱结果可知, Ni40 粉末激光熔覆层的物相主要有 Ni 固溶体、Ni₃B 化合物及一些未检出的物相。结合 Ni40 熔覆层材料的化学成分, 熔覆层中可能存在的相包括 CrB、Cr₇C₃、M₂₃(C, B)、Ni₂B 等。Ni 固溶体具有良好的塑韧性, 提供了韧性基体, Ni₃B 等金属化合物具有很高的硬度, 这些强化相弥散分布在韧性基体中, 大大提高了熔覆层的硬度和耐磨性。但过多的金属化合物使得熔覆层脆性加大, 在激光快热快冷的热循环形成极高热应力的作用下, 熔覆层沿着脆硬相开裂。

Co40 粉末激光熔覆层的物相主要有面心立方结构的 γ-Co 固溶体, 还有未检出的其他物相。结合 Co40 熔覆层材料的化学成分, 熔覆层中可能存在的相包括 Co、Cr、W 的碳化物组织。其中, 纯 Co 会在 417 °C 由面心立方结构转变为密排六方结构, 即在平衡结晶的条件下, 纯 Co 是以密排六方结构存在于室温条件下的。但由于激光熔覆过程中, 冷却速度比较快, 而且由面心立方结构转变为密排六方结构的速度非常缓慢, 因此在熔覆层中面心立方结构的 γ-Co 固溶体仍能保持到室温。由于 Co40 熔覆层的强化主要以固溶强化为主, 所以其拥有很好的韧性和抗裂性。



a) 35-Ni40试样

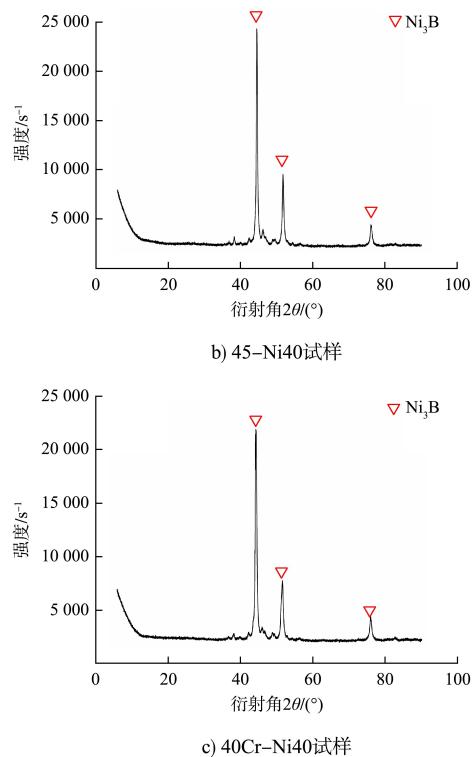


图4 X射线衍射图谱

Fe40 粉末激光熔覆层的物相主要有奥氏体 γ -Fe, 还有未检出的其他物相。结合 Fe40 熔覆层材料的

化学成分, 熔覆层中可能存在的相包括马氏体、FeCr、M23C6 等。奥氏体 γ -Fe 具有良好的塑韧性, 提供了韧性基体, 但同时存在马氏体这种韧性相对不足的基体, FeCr、M23C6 等金属化合物具有很高的硬度, 这些强化相大大提高了熔覆层的硬度和耐磨性。但相对 Ni40 的韧性基体, Fe40 的基体的韧性相对不足, 在激光熔覆热应力的作用下, Fe 熔覆层更容易产生裂纹。

2.5 盐雾试验分析

盐雾试验用于评价激光熔覆层的耐腐蚀性。每个激光熔覆试件制备 1 个试样, 试样尺寸 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。由于铁基粉末 Fe40 试件存在大量裂纹, 所以未对铁基粉末试件的盐雾试验取样加工。为了充分进行对比, 另外准备 2 块试样用于结果对比分析, 分别为传统工艺下的基体材料 38CrMoAlA 渗氮和 45 钢镀铬试样。按照 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》规定^[10], 采用中性盐雾试验方法, 试验周期 1 500 h。

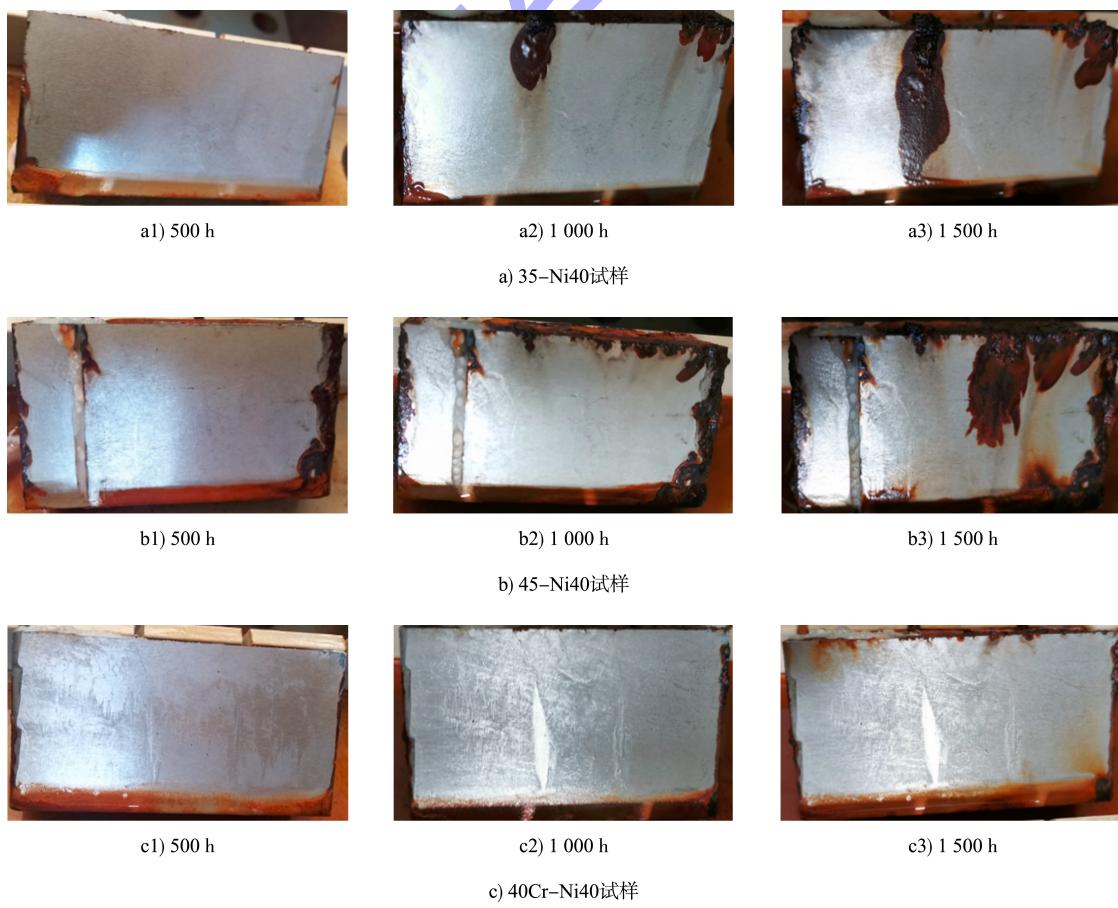




图 5 盐雾试验结果

由图 5 可知, 盐雾试验 500 h 时, Ni40 熔覆层表面、Co40 熔覆层表面、镀铬表面均无明显锈蚀, 边缘的碳钢基材有一些锈蚀, 38CrMoAlA 渗氮层表面出现部分锈蚀; 当盐雾试验 1 000 h 时,

35-Ni40、45-Ni40 从试样边缘向中心位置的碳钢侧出现锈点, 主要是由于试样边缘为熔覆焊道的起始点或收尾点, 与试样的加工有关; 当盐雾试验 1 500 h 时, 35-Ni40、45-Ni40 锈蚀点开始扩大,

中心部位的其他区域并没有生成新的锈蚀点, 主要原因是随着盐雾试验时间的增加, 锈蚀层深度也在增加, 另外, 由于锈蚀在盐雾液体的冲蚀及重力作用下向下流挂, 表面的锈蚀面积扩大; 镀铬试样的锈蚀面积扩大, 其余部位没有出现新的锈蚀点, 说明镀铬的防腐性能较好, 但要保证镀层的厚度; 38CrMoAlA 渗氮锈蚀的面积和深度都在增加; 其余试样除四周边缘的碳钢位置锈蚀有所增加外, 中心部位无明显变化。

可见, 激光熔覆 Ni40、Co40 粉末及镀铬表面都有良好的耐蚀性, 其中, 激光熔覆 Co40 的耐腐蚀性最好, 激光熔覆 Ni40 的耐蚀性较镀铬表面稍好, 而 38CrMoAlA 渗氮表面的耐蚀性相对较差。

3 结论

1) 由宏观金相可知, 激光熔覆无法完全避免显微缺陷, Ni40 和 Co40 粉末激光熔覆层的疏松和气孔缺陷是可接受的, 但是 Fe40 激光熔覆层存在裂纹, 是不可接受的缺陷。

2) 由微观金相可知, 激光熔覆层与基材完全形成冶金结合, 并有非常低的稀释率, 因此, 激光熔覆是一种优良的表面改性方法。在 Fe40 激光熔覆层的金相组织中能发现微孔和微裂纹, 这是其开裂的一个主要原因。

3) 对熔覆层的硬度进行试验分析, 同种粉末激光熔覆层匹配不同基材的硬度值相差很小。Fe40 熔覆层的硬度比其他 2 种材料都小。

4) 对熔覆层进行 X 射线衍射, 分析其衍射图谱, 获得材料的物相成分。激光熔覆层一般通过熔覆粉末在凝固后形成的固溶体固溶强化和金属化合物的二次项强化来提高硬度。由于粉末化学成分的差异, 激光熔覆层在保持一定硬度的同时, 其韧性和抗裂性也不相同。其中 Fe40 在激光熔覆热应力的作用下, 熔覆层更容易产生裂纹。

5) 由盐雾试验可知, 激光熔覆 Ni40、Co40 粉末及镀铬表面都有良好的耐蚀性, 其中, 激光熔覆 Co40 的耐腐蚀性最好, Ni40 的耐蚀性较镀铬表面稍好, 而 38CrMoAlA 渗氮表面的耐蚀性相对

较差。

6) Ni40 粉末和 Co40 粉末都具有较高的硬度和优良的耐腐蚀性能, Co40 的性能略优于 Ni40, 但 Co40 的价格更高。因此 Ni40 和 Co40 粉末都能满足底枢蘑菇头和轴激光熔覆的性能要求。Fe40 和其他 2 种材料相比, 在各性能上都存在差异, 不适合用来做激光熔覆粉末。

7) 激光熔覆试验结果表明, 同种粉末在不同钢材基体的熔覆层表现出基本相同的试验结果, 包括金相组织、硬度试验、物相分析、盐雾试验。说明激光熔覆涂层的性能与基材相关性较小, 主要取决于熔覆的粉末。

参考文献:

- [1] 赵新泽, 苏丹, 徐翔, 等. 基于表面轮廓的人字闸门底枢蘑菇头磨损量测量方法[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10): 87-91.
- [2] 刘海, 王树林. 船闸底枢摩擦副设计及摩擦学行为分析[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 960-964.
- [3] 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.
- [4] 郑江鹏, 初铭强, 张书彦. 铸铁材料激光熔覆修复表面强化技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 1-6, 10.
- [5] 姜波, 李金朋. 激光熔覆技术研究现状与发展[J]. 科技创新导报, 2018, 15(32): 53-54.
- [6] 祝柏林, 胡木林, 陈俐等. 激光熔覆层开裂问题的研究现状[J]. 金属热处理, 2000, 25(7): 1-4.
- [7] 刘录录, 孙荣禄. 激光熔覆技术及工业应用研究进展[J]. 热加工工艺, 2007, 36(11): 58-61.
- [8] HOFMEISTER W, WERT M, SMUGERESKY J, et al. Investigation of solidification in the laser engineered net shaping (LENSTM) process [J]. Journal of metals, 1999, 51(7): 1-6.
- [9] 邱星武, 李刚, 邱玲. 激光熔覆技术发展现状及展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(3): 54-57, 66.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.