

冷作模具曲面激光熔覆修复工艺及路径研究

任德亮¹, 林齐², 李婷², 齐海波^{2,3}

(1.河北大学 电子信息工程学院, 河北 保定 071002;

2.石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050043;

3.河北省交通工程材料重点实验室, 石家庄 050043)

摘要:目的 冷作模具在高压力和高冲击力作用下易磨损, 传统的修复方式效率慢、自动化程度低, 导致冷作模具报废率高, 故采用激光熔覆技术对其进行修复, 以获得具有优良使用性能的修复层。方法 利用修复质量高、修复速度快的激光熔覆技术与空间自由度大、操作灵活的机器人技术相结合的方法获得熔覆层, 基于组织观察、硬度分析和摩擦磨损实验观察检测熔覆层质量。结果 熔覆最佳工艺参数为: 功率 1500 W, 扫描速度 2 mm/s, 载气 6 L/min, 送粉器转速 10 r/min, 搭接率 1/2。熔覆层硬度为 350~430HV, 远高于基体硬度。结论 沿曲面短边方向由下往上做“之”字形扫描, 熔覆效果最优。多道多层激光熔覆时, 下一层的起点相对于上一层的起点偏移 1.5 mm, 得到的熔覆成形效果较好。微观组织分析表明, 熔覆层与基体之间的界面冶金结合, 熔覆层主要由致密的树枝晶组成。熔覆层的耐磨损性能明显优于基体。

关键词: 冷作模具; 激光熔覆; 曲面修复; 路径

中图分类号: V261.8; TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)03-0054-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.009

Laser Cladding Repair Technology and Path of Cold-worked Dies

REN De-liang¹, LIN Qi², LI Ting², QI Hai-bo^{2,3}

(1.School of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China;

2.School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3.Hebei Province Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang 050043, China)

ABSTRACT: Cold-worked dies have a high rejection rate due to wear susceptibility at high pressure and high impact force, and inefficient and low-level automation of traditional repair methods. The work aims to obtain a repair layer exhibiting excellent service performance by repairing the dies by adopting laser cladding technology. A cladding layer was obtained by combining laser cladding technology which featured in high repair quality and rapid repair rate with robot technology which featured in high spatial freedom and flexible operation. Quality of the cladding layer was observed based on microstructure observation, hardness analysis as well as friction and wear test. Optimum process parameters were as follows: laser power of 1500 W, scanning speed of 2 mm/s, carrier gas of 6 L/min, powder feeder speed of 10 r/min, and overlapping ratio of 1/2. Hardness of the

收稿日期: 2017-09-11; 修订日期: 2017-12-30

Received: 2017-09-11; Revised: 2017-12-30

基金项目: 河北省科技支撑计划资助项目 (14211810D); 河北省高校重点学科建设项目

Fund: Supported by Program of Science and Technology Plan Supporting of Hebei Province (14211810D), Program of the Key Disciplines Construction Supporting University of Hebei Province

作者简介: 任德亮 (1964—), 男, 教授, 主要研究方向为焊接材料与工艺。

Biography: REN De-liang (1964—), Male, Professor, Research focus: materials and process of welding.

通讯作者: 齐海波 (1972—), 男, 教授, 主要研究方向为增材制造、复合材料制造与数值模拟。

Corresponding author: QI Hai-bo (1972—), Male, Professor, Research focus: increasing material manufacturing, composite materials and numerical simulation.

cladding layer was 350~430HV, which was well above that of the substrate. In single layer experiments, the best path is scanning zigzag along short edge of camber from the botttom up. In multi-pass multilayer cladding experiments, more effective method is to shift starting points of the second layer by 1.5 mm compared to that of the first layer. The microstructure analysis shows that interface between the cladding layer and the substrate exhibites metallurgical bonding, the cladding layer mainly consists of dense dendrite, and wear resistance of cladding layer is superior to that of the substrate.

KEY WORDS: cold-worked dies; laser cladding; camber repair; path

冷作模具在汽车、电子、电器、家电和通信等产品中的应用十分广泛,其工作服役时承受大的压力或冲击力,并且持续与被加工材料表面相互摩擦,二者同时作用,大大降低了冷作模具的使用寿命,致使模具失效^[1]。冷作模具一旦失效,重新制造不仅成本高,而且周期长。激光熔覆作为一种高能量密度的加工手段,热影响区是氩弧焊的十分之一^[2],具有热输入少、残余应力小、修复速度快等优点^[3-4],熔覆粉末的化学成分可调与可控,修复涂层的显微组织细小且致密,与基材呈结合强度高的冶金结合,因此激光熔覆在平面及凸曲面模具修复中得到了广泛的应用^[5],也为使用低成本材料制造高性能零件开辟了新道路^[6]。

但是,激光熔覆在凹曲面模具失效修复中的研究及应用相对较少。苏州大学姜付兵等人在基于光内送粉技术的激光熔覆试验研究中,通过操纵机器人带动熔覆头做连续变姿态运动,解决了喷头空间倾斜送粉过程中粉末汇聚性差的难题,实现了大角度零部件的熔覆^[7]。清华大学何金江等人建立了一套垂直送粉喷嘴及垂直送粉强化系统,对缸体缸套内外侧面进行了修复与强化^[8]。德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 Nowotny 等人利机器人实现了小角度零部件的熔覆修复^[9]。

本文主要针对凹曲面的冷作模具进行激光熔覆修复,利用六轴联动机器人实现熔覆工艺的路径规划和工艺试验^[10]。

1 试验内容

1.1 试验材料与设备

试验采用美国 IPG 公司 YLS-4000W 光纤激光器,光斑直径 2 mm,离焦量+2 mm。机器人采用德国 KUKA 六轴联动机器人,机器人离线编程软件为意大利 Robomove。送粉器是北京航空制造工程研究所 DPSF-2 型送粉器,送粉器的转速决定粉末供给速率。基体材料为 Cr12 冷作模具钢,凹曲面的曲率半径为 567 mm,化学成分见表 1。熔覆材料与基体材料含有共同的化学元素 C、Cr、Si、Fe,有利于粉末和基体的浸润合金化^[11]。熔覆材料是自行配制的颗粒尺寸为-150~+300 目的 Ni60 粉末,化学成分见表 2。熔覆前用无水乙醇清洗基体材料,熔覆材料和基体均置于真空干燥箱进行干燥。

表 1 Cr12 冷作模具钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Cr12 cold-worked die steel

wt%						
C	Cr	Si	Mn	S	P	Fe
2.00~2.30	11.50~13.0	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.030	Bal.

表 2 Ni60 的化学成分
Tab.2 Chemical composition of Ni60

wt%					
Ni	Cr	Fe	Si	B	C
60	16	15.5	4.5	3.5	0.5

1.2 激光熔覆试验工艺参数的确定

1) 单道激光熔覆工艺参数确定。激光功率、扫描速度、送粉器转速和载气量是影响单道激光熔覆成型的主要因素,为了减少试验工作量,本文采用 L₁₆(4⁵)正交表进行试验设计,具体参数如表 3 所示。

表 3 正交试验因素及水平表
Tab.3 Factors and levels of orthogonal test

水平	载气/ (L·min ⁻¹)	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	功率/W
1	3	1	8	800
2	4	2	10	1100
3	5	3	12	1500
4	6	4	14	1800

2) 多道激光熔覆搭接率试验。在单道熔覆的基础上进行多道搭接试验,搭接率分别取 1/3、1/2 和 2/3。

1.3 熔覆模型建立及路径规划

1.3.1 熔覆模型建立

首先在 Solidworks 上建立模具需要修复部位的三维模型,然后利用离线编程软件 Robomove 将该模型转换成 KUKA 机器人所能识别的 SRC 文件,并将 SRC 文件导入实验室自行开发的数据转换软件 Filechange 1.0,把 KUKA 机器人所能识别的切削加工指令转变成激光熔覆修复的指令^[10],最后驱动 KUKA 机器人实现曲面激光熔覆修复。

1.3.2 单层曲面熔覆路径规划

以工作台平面为 x-o-y 面,与工作台垂直的方向

为 z 轴建立坐标系,建立三种熔覆修复路径^[12],如图1所示。路径一沿长边(曲线),路径二沿短边从下往上,路径三沿短边从上往下。

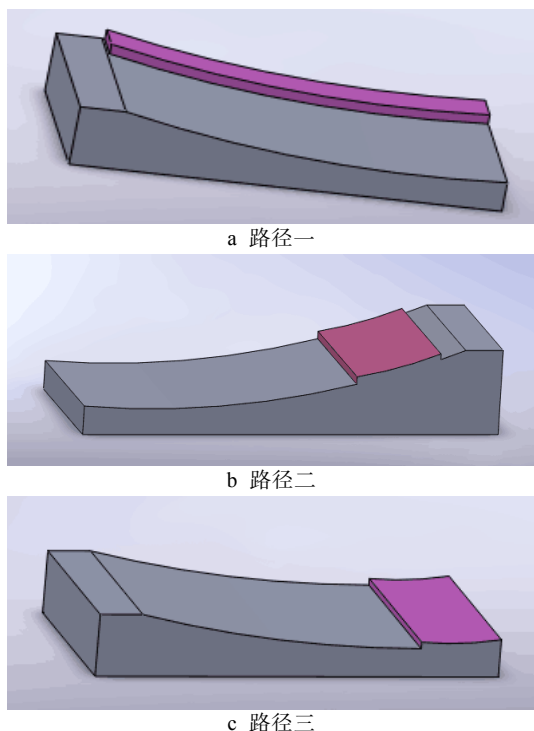


图1 单层曲面修复路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-layer camber repair path: (a) path I, (b) path II, (c) path III

1.3.3 多层曲面熔覆路径规划

在单层曲面熔覆试验的基础上,选取单层熔覆效果好的熔覆路径进行多层曲面熔覆试验,建立了如图2所示的两种熔覆方法:方法一,多层熔覆路径为第二层与第一层熔覆路径完全重合;方法二,多层熔覆路径为第二层起点与第一层起点沿搭接方向偏移1.5 mm。

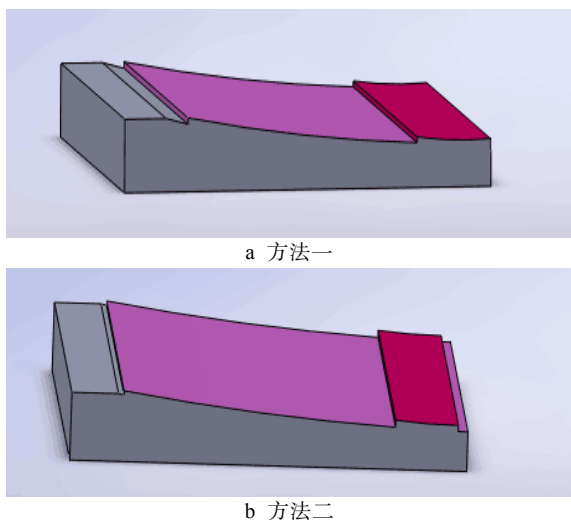


图2 多层曲面修复路径方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of multilayer camber repair path: (a) method I, (b) method II

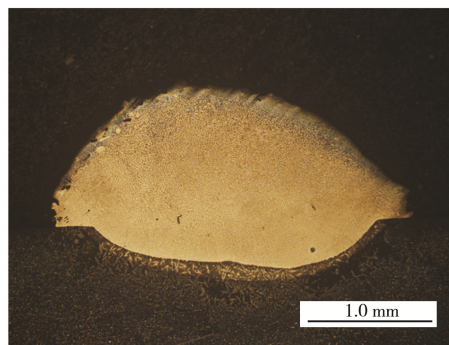
2 试验结果分析

2.1 单道熔覆

按照 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行16组单道熔覆试验,熔覆层的尺寸受光斑直径、激光功率、扫描速度、送粉量的共同影响,并随工艺参数的变化而变化。例如送粉器转速越大,熔覆的粉末越多,熔覆层越宽,同理降低扫描速度也会使熔覆层宽度变大。而且熔池还受表面张力、重力及保护气体的冲击作用,熔池会外扩或收缩,尺寸也会有所变化。因此,熔覆层尺寸不完全由光斑直径决定。经分析,单道熔覆线宽度3 mm和高度1 mm为最优值。16组试验得到熔覆线的宽度与高度与最优值进行比较,算出每组试验的实际得分,然后进行极差分析,得到最优的单道熔覆工艺参数为:载气6 L/min,激光功率1500 W,扫描速度2 mm/s,送粉器转速10 r/min,离焦量+2 mm,保护气体10 L/min^[10]。图3a为最优条件下的熔覆层宏观形貌,图3b为该试样熔覆层横截面微观形貌,熔覆层宽度为3.15 mm,高度为1.08 mm,稀释率为20.4%。从图3b可发现,熔覆层与基体之间有“白亮带”存在,表明熔覆层与基体之间实现了良好的冶金结合^[13];同时高宽比接近1/3,可以有效避免熔覆层内工艺孔洞的产生。



a 单道熔覆层表面形貌



b 单道熔覆层截面

图3 单道熔覆层形貌

Fig.3 Morphology of single-pass cladding layer: (a) surface morphology of single-pass cladding layer, (b) section of single-pass cladding layer

2.2 多道激光熔覆

多道熔覆试验结果如图4所示。图4a是搭接率为1/3的试验结果,熔覆层表面粗糙不平,搭接量小致使熔合不良,且凹陷明显。图4b为搭接率1/2的试验结果,熔覆层表面较光滑平整。图4c为搭接率2/3的试验结果,表面粗糙不平,凸起较多,由于搭

接量过大造成前一道 2/3 发生了重熔, 且积累了过多的热量, 可能造成熔覆层组织粗大和热影响区过大, 影响了熔覆层的整体质量和成形效率。图 4b 成形效果优于前两者, 因此最终多道之间的搭接率定为 1/2。

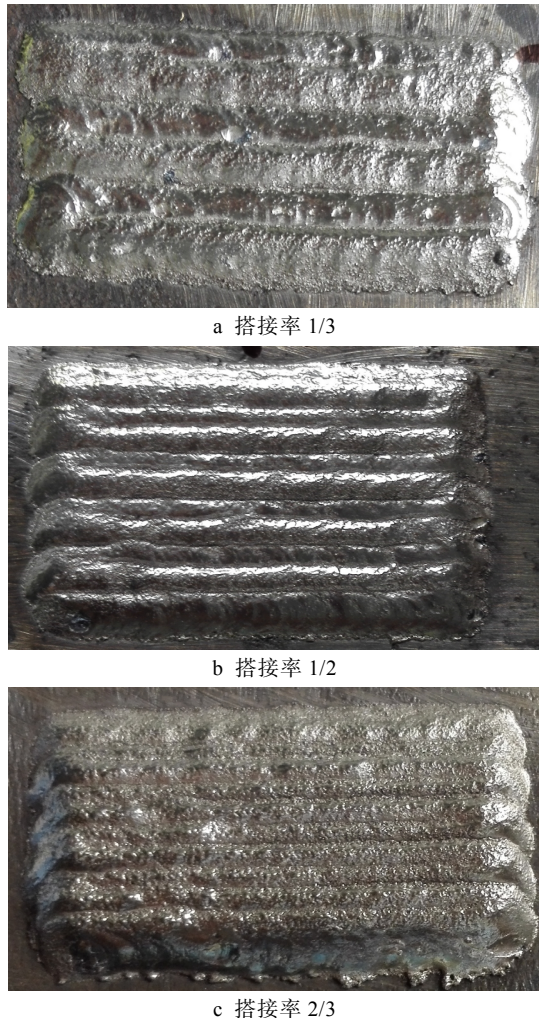


图 4 不同搭接率熔覆层表面形貌

Fig.4 Surface morphology of cladding layers at different overlapping ratio: (a) overlapping ratio of 1/3, (b) overlapping ratio of 1/2, (c) overlapping ratio of 2/3

2.3 单层曲面熔覆

2.3.1 沿长边曲面熔覆

图 5 为 KUKA 机器人操纵激光熔覆头沿长边(曲线)的熔覆效果, 整体上熔覆表面平整度低。机器人进行曲线运动时会把曲线折线化, 由多步折线组成, 精度有所降低, 从而使激光熔覆修复的表面质量有所下降。另外, 长边的曲率大, 在保证离焦量固定不变的前提下, 机器人需要根据修复位置实时调整 z 向高度, 每次调整约有 0.1~0.3 s 的延迟, 此时激光和送粉器处于工作状态, 成形在停顿处继续进行, 从而也影响到了熔覆修复层的表面质量。



a 熔覆层整体形貌



b 熔覆层截面形貌

图 5 沿长边扫描熔覆层形貌

Fig.5 scanning along the long side: (a) overall morphology, (b) section morphologies

2.3.2 沿短边从下往上熔覆

KUKA 机器人操纵激光熔覆头沿短边做“之”字形扫描, 熔覆一道后, 由低端向高处运动进行下一道的熔覆成形, 效果如图 6 所示。可知熔覆完后, 凹表面弧度曲率半径变化小, 机器人在调整 z 轴时的误差小且运行时间相对较短, 修复层与原有曲面吻合度高。熔覆头提高时, 由于时间短, 使粉末堆积现象不严重, 熔覆表面光滑度高。熔覆堆积过程为从下至上, 先熔覆成形道可以作为当前成形道的支撑, 抑制了液态金属向下流动造成熔覆层高度下降的不良影响。此外, 由于沿短边熔覆过程中每道的高度一样, 从而离焦量不变, 不会出现机器人频繁调整 z 向高度所带来的延迟, 提高了单道熔覆的质量。此外, 沿短边扫描时, 已熔覆道很快会经受下一道激光熔覆时重叠部位升温的影响, 温度下降缓慢, 成形区域整体温度均匀, 降低了残余应力, 减少了开裂的可能^[14]。

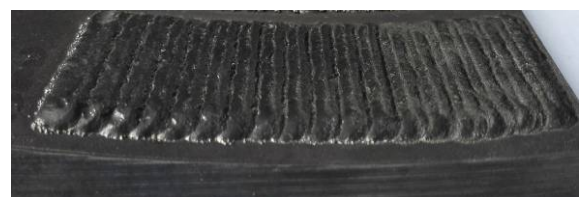


图 6 路径一熔覆形貌

Fig.6 Morphology of path I cladding

2.3.3 沿短边从上往下熔覆

KUKA 机器人操纵激光熔覆头沿短边方向做“之”字形扫描, 一道熔覆完后沿短边由高端向低处进行搭接, 效果如图 7 所示, 熔覆层表面严重不平。与沿短边由下至上熔覆修复过程不同的是, 较低处堆积着更多未熔化的粉末及飞溅的熔渣, 当激光熔覆到此处时, 未熔粉末、熔渣及当前熔覆粉末三者共同作用, 会造成此部位过堆, 出现凸起。反之, 在沿短边由下

至上熔覆过程中,未熔化的粉末及飞溅的熔渣在重力作用下往低处流动,飞溅到高处的熔渣少,不会对高处待修复部位造成过大的影响。



图 7 路径二熔覆形貌
Fig.7 Morphology of path II cladding

2.4 两层曲面熔覆

在上述研究的基础上,确定了沿短边由下至上熔覆的两层多道曲面激光熔覆修复方案。图 8 为两种两层多道熔覆效果图,两种修复路径所得表面光滑度均较好,但起点偏移一段距离的效果要优于起点重合的效果。原因在于起点偏移会使下一层熔覆修复的单道处于上一层两条熔覆道的搭接处,从而在一定程度上填补了上一层搭接处的凹坑。需要说明的是,搭接率越高,搭接部位越易出现凸起,搭接率越低则越易出现凹坑。本试验中,1/2 搭接率对应的熔覆效果有少量凹坑,偏置 1.5 mm 后填补了上一层搭接处存在的凹坑,表面质量比单层曲面熔覆后的更高。



a 方法一的熔覆形貌



b 方法二的熔覆形貌

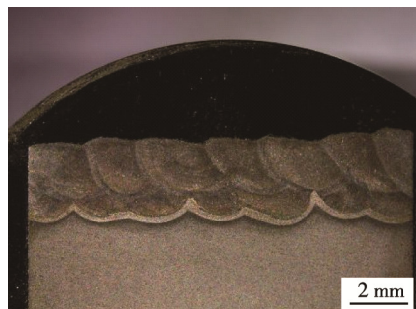
图 8 两种方法曲面修复效果

Fig.8 Effect of two camber repair methods: (a) morphology of method I, (b) morphology of method II

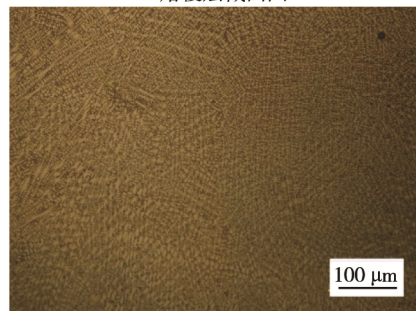
2.5 激光修复层形貌及性能分析

图 9 为体式显微镜下观察的激光曲面熔覆成形状态,表面光滑平整,无裂纹。从图 9a 可以清晰看到熔覆层弧形搭接区域,层与层之间重熔,第二层熔覆层厚度大于第一层熔覆层厚度,这是由于第二层熔

覆时第一层有部分出现了重熔,且基体经过第一层熔覆后温度升高,粉末利用率得以提高,从而熔覆高度增加。图 9b 为既没有发生道与道之间搭接,也没有发生层与层之间搭接的熔覆组织形貌。图 9c 为搭接区微观形貌,熔覆层组织为明显的树枝晶,搭接区域由于存在重熔,输入能量较未搭接区域多,所以晶粒较粗大。从图 9c 中还可发现,前一道熔覆层重熔部分的晶粒生长方向多变,这与晶体的生长方向由晶体学取向和热流方向共同决定有关^[15]。



a 熔覆层截面图



b 熔覆层放大200倍



c 熔覆层搭接处放大200倍

图 9 修复层宏观与微观形貌

Fig.9 Macro- and micro- morphology of repair layer: (a) sectional view of laser cladding layer, (b) 200X view of cladding layer, (c) 200X view of overlapped spot

图 10 为熔覆层及基体的硬度分布,可以看出熔覆层的硬度在 350~430HV 之间,基体的硬度在 250HV 左右,熔覆层的硬度明显高于基体。在熔合区,硬度急剧升高,这是由于熔合区界面处的基体中 Fe、C 等元素向熔覆层扩散,快速冷却生成铁基马氏体,使其硬度值能达到 500HV。由于稀释现象的存在,距基体距离越小,硬度值越低,但仍远高于基体硬度。

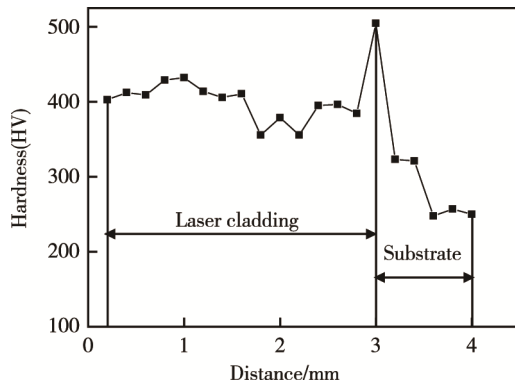


图 10 熔覆层硬度分布
Fig.10 Hardness distribution of cladding layer

利用摩擦磨损试验检测多道多层熔覆层的摩擦性能。磨损试验使用的设备为济南方辰 MMW-1 立式摩擦磨损试验机。试验材料为多层镍基合金熔覆层和工作状态下的 Cr12 冷作模具钢 (455~580HV), 对磨材料要承受很大的压力以及摩擦力, 由于工作状态下的 Cr12 和熔覆材料硬度和耐磨损性能均较高, 所以应选用具有较高硬度和耐磨性的对磨材料。本试验选用 GCr15 作为对磨材料, 试验压力分别为 25、50、75、100、125 N, 转速为 850 r/min, 磨损时间为 15 min, 磨损环境为室温。图 11 为压力不同、时间相同情况下熔覆层与基体的磨损量。随着接触压力的增大, 两种材料的磨损量均有升高的趋势, 而激光熔覆修复后的材料磨损量的增加值较小, 且接触压力越大, 激光熔覆修复后材料的耐磨性越显著。

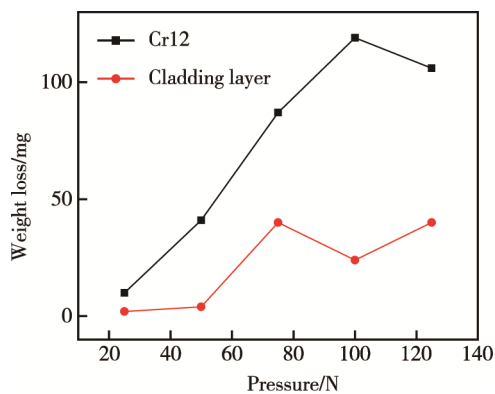


图 11 Cr12 和熔覆层磨损量
Fig.11 Wear extent of Cr12 and cladding layer

图 12 为基体及熔覆层分别与 GCr15 对磨后的扫描电镜照片。可以看出, 基体磨损后的表面形貌较粗糙, 表面有明显的麻点、刮伤和沟槽等, 而熔覆层的表面比较光滑, 表明熔覆修复后的材料抗磨损性能优于基体 Cr12 材料。

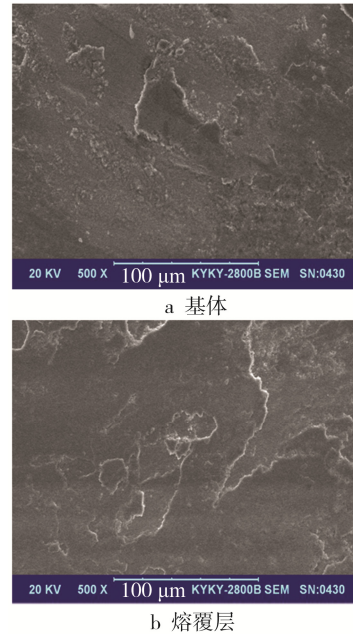


图 12 熔覆层及基体磨损后表面形貌
Fig.12 Surface morphology of worn substrate and cladding layer: (a) substrate, (b) cladding layer

3 结论

1) 通过单道工艺试验, 确定了 Cr12 冷作模具钢的激光熔覆优化工艺参数。通过多道工艺试验, 确定了道与道之间的搭接率为 1/2。

2) 多道单层的扫描路径试验表明, 机器人沿曲面的短边方向由低向高做“之”字形扫描, 得到的熔覆层质量最佳。

3) 多道多层激光熔覆时, 下一层的起点相对于上一层的起点偏移 1.5 mm, 得到的熔覆成形效果较好。

4) 熔覆层与基体之间为良好的冶金结合, 熔覆层组织为树枝晶, 显微硬度在 350~430HV 之间, 明显优于基体硬度值 (约 250HV), 且熔覆层的耐磨损性优于基体。

参考文献:

- [1] 周杰. CO₂ 激光熔覆修复冷作模具表面的组织及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
ZHOU Jie. Study on the Structure and Properties of Cold Mold Surface Repaired by CO₂ Laser Cladding [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [2] 王玉峰. 汽车冲压模激光修复技术的研究[J]. 模具制造, 2014(5): 94-96.
WANG Y F. Research on Repair Technology of Laser Automobile Stamping Die[J]. Mold Manufacturing, 2014(5): 94-96.

- [3] 张坚, 吴文妮, 赵志龙, 等. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131-133.
ZHANG Jian, WU Wen-ni, ZHAO Zhi-long, et al. Research Status and Development Trend of Laser Cladding[J]. Hot Working Process, 2013, 42(6): 131-133.
- [4] 田凤杰, 刘伟军, 尚晓峰, 等. 基于激光熔覆的绿色再制造技术研究[J]. 工艺与检测, 2009(2): 110-112.
TIAN Feng-jie, LIU Wei-jun, SHANG Xiao-feng, et al. Study on Green Remanufacturing Technology Based on Laser Cladding[J]. Process and Inspection, 2009(2): 110-112.
- [5] 戴晓光. 激光熔覆修复挤压模具技术研究[J]. 机电工程技术, 2014(4): 106-107.
DAI X G. Study of Extrusion Die Repaired by Laser Cladding[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2014(4): 106-107.
- [6] 马向东, 雷雨, 刘睿, 等. 激光熔覆合金技术在模具修复中的应用[J]. 润滑与密封, 2010, 35(11): 98-101.
MA X D, LEI Y, LIU R, et al. The Application of Laser Laser Cladding Technique in Dies Repairing[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(11): 98-101.
- [7] 姜付兵, 石世宏, 石拓, 等. 基于光内送粉技术的激光加工机器人曲面熔覆试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 2-6.
JIANG F B, SHI S H, SHI T, et al. Study on Curve Cladding of Laser Machining Robot Based on Internal Powder Feeding Technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 2-6.
- [8] 何金江, 钟敏霖, 刘文今. 垂直表面送粉激光强化系统与应用研究[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 322-324.
HE J J, ZHONG M L, LIU W J. Investigation on Laser Modification with Power Feeding for Vertical Surfaces[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 322-324.
- [9] NOWOTNY S, SCHAREK S, BEYER E, et al. Laser Beam Build-up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 344-348.
- [10] 李婷. 冷作模具凹曲面激光熔覆修复工艺研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
LI T. Research on Repairing Cold Mold with Concave Surface by Laser Cladding[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [11] 李金华, 姚芳萍, 张德强, 等. 基于激光熔覆的模具数字化快速修复技术研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 158-159.
LI J H, YAO F P, ZHANG D Q, et al. Research on Digital Repairing of Mould Based on Laser Cladding[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(12): 158-159.
- [12] QI H B, YA Y N, LIN F, et al. Scanning Method of Filling Lines in Electron Beam Selective Melting[J]. Journal of Engineering Manufacture, proceedings Part B, 2007, 230(B12): 1685-1694.
- [13] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇, 等. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
ZHOU Y H, HU Z Q, JIE W Q, et al. Solidification Technique[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [14] 齐海波, 杨明辉, 齐芳娟. 扫描路径对电子束选区熔化 TC4 成形件性能影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 5-8.
QI H B, YANG M H, QI F J. Numerical Simulation of the Influence of Scanning Paths on the Performance of Electron Beam Selective Melting TC4[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 5-8.
- [15] 黄凤晓. 激光熔覆和熔覆成形镍基合金的组织与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
HUANG F X. An Investigation on Microstructure and Properties of Ni-based Alloy by Laser Cladding and Laser Cladding Forming[D]. Changchun: Jilin University, 2011.