

摩擦与润滑

复杂热冲压模具型面的激光熔覆强化及摩擦磨损控制技术

陈 炜¹, 王逸凡¹, 刘 杰¹, 曹一枢², 白 瑛², 陈春刚², 张小计²

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 无锡曙光精密工业有限公司, 江苏 无锡 214145)

摘要: 由于服役条件恶劣, 热冲压模具的工作型面容易产生磨损与裂纹, 而传统强化方式在减小模具磨损的同时存在诸多限制。为了实现复杂模具型面的熔覆, 通过机械手和变位机变姿实现了激光熔覆路径优化, 并采用差温往复摩擦磨损实验装置模拟了热冲压工况, 分析了激光熔覆层的摩擦磨损性能。研究结果表明, 铁基粉末与钴基粉末两种熔覆层均能有效减小摩擦因数与模面磨损量, 其中 Stellite 12 钴基粉末的激光熔覆层的摩擦因数与磨损量最小。扫描电子显微镜观测发现, Fe901 铁基粉末与 Stellite 12 钴基粉末的激光熔覆层表面出现的氧化层与化合物起到了润滑减磨作用, 实现了模面磨损控制。

关键词: 激光熔覆; 摩擦磨损; 热冲压模具; 铁基粉末; 钴基粉末

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.024

中图分类号: TN249; TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0186-08

Laser cladding strengthening of complex hot stamping die surface and friction and wear control technology

Chen Wei¹, Wang Yifan¹, Liu Jie¹, Cao Yishu², Bai Ying², Chen Chungang², Zhang Xiaoji²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Wuxi Shuguang Precision Industry Co., Ltd., Wuxi 214145, China)

Abstract: Due to the bad service condition, the working surface of hot stamping die is easy to be worn and cracked, and the traditional strengthening methods have many limitations while reducing the die wear. Therefore, in order to achieve the cladding of complex die surface, the laser cladding path was optimized by changing the posture of manipulator and positioner, and the hot stamping condition was simulated by the differential temperature reciprocating friction and wear experimental device to analyze the friction and wear properties of laser cladding layer. The research results indicate that both cladding layers of Fe-based powder and Co-based powder effectively reduce the friction factors and the wear amount of die surface, and the laser cladding layer of Stellite 12 Co-based powder has the smallest friction factor and wear amount. Scanning electron microscopy observation reveals that the oxide layer and compound on the surfaces of laser cladding layers for Fe901 Fe-based powder and Stellite 12 Co-based powder play a role in lubricating and reducing wear, achieving the wear control of die surface.

Key words: laser cladding; friction and wear; hot stamping die; Fe-based powder; Co-based powder

热冲压制件具有成形好、性能优异、生产周期短等特点, 在汽车轻量化中应用较为广泛。在生产过程中, 由于高频率的循环热力载荷导致热冲压模具型面容易产生磨损、裂纹、塑性变形等表面损伤, 直接导致模具失效^[1-2]。目前, 有许多传统表面强化技术, 如物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD)、化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)、渗氮等, 能够有效地减小模具磨损、延长模具使用寿命, 但也存在诸多问题, 例如: PVD 镀层和 CVD 镀层的化学亲和力会影响制件表

面质量, 渗氮工艺的要求高等。激光熔覆作为新型的绿色表面强化技术能够有效增强模具型面的耐磨性^[3]。Seo J W 等^[4]使用激光熔覆技术大幅度减小了钢轨的磨损。江苏大学陈炜等^[5]在 H13 钢表面制备 Stellite12 钴基粉末激光熔覆层, 有效地减小了高温下 3 种镀层的超高强度钢板的热冲压模具磨损。屈海艳等^[6]在 H13 模具钢表面激光熔覆镍基高温合金层, 分析结果显示, 熔覆层性能远高于基材。刘立君等^[7]使用超声辅助激光熔覆强化了 H13 模具钢表面的各项力学性能, 提高了模具服役时间。目前, 限制激光熔覆应用的关键在于无法高效地对复杂模面进行高精度熔覆。

对于这个问题, 国内外许多学者对激光熔覆在模具上的应用进行了研究。任德亮等^[8]在冷作模具表面的曲面部分制备 Ni60 涂层, 实验过程中沿短边

收稿日期: 2023-08-05; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 2022 年度无锡市“太湖之光”科技攻关 (产业化关键技术攻关) 项目 (WX0304B010301220019PD)

作者简介: 陈 炜 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: chen_wei@ujs.edu.cn

做“之”字形扫描，得到的熔覆层质量最佳。黄勇等^[9]提出了曲面激光熔覆快速加工路径生成方法，通过逆向云点模型获得平面与模具曲面相交的离散点来近似熔覆路径，最终成功在模具曲面零件上制备了镍基熔覆层。王鑫龙^[10]对复杂曲面浅层损伤模具进行损伤边界提取，采用点云切片技术和切三角面片生成熔覆加工路径。Bourahima F 等^[11]分析了工艺参数对曲面熔覆层形貌的影响，并成功在圆弧面上制备了稀释率小的熔覆层。Calleja A 等^[12]通过五轴激光熔覆沉积工艺实现了叶片的激光强化。

本文通过机械手和变位机联动实现了复杂热冲压模具型面的曲面熔覆，并通过自研的差温往复式摩擦磨损实验装置验证了激光熔覆层的耐磨性能。

1 激光熔覆及摩擦磨损实验

1.1 实验材料

实验基材为 H13 钢，熔覆粉末选择具有代表性的北矿新材料科技有限公司的 Fe901 铁基粉末与性能较好的肯纳司太立金属有限公司的 Stellite 12 钴基粉末，其主要成分如表 1 所示。将淬火至 52 HRC 的 H13 钢作为摩擦实验的对照组，在 H13 钢表面熔覆 Fe901 铁基粉末与 Stellite 12 钴基粉末作为实验组。Fe901 铁基粉末使用的熔覆工艺为：激光功率为 1800 W，光

表 1 H13 钢、Fe901 铁基粉末和 Stellite 12 钴基粉末的元素组成 (%, 质量分数)

Table 1 Element compositions of H13 steel, Fe901 Fe-based powder and Stellite 12 Co-based powder (%, mass fraction)

| 材料 | C | Si | Cr | Mn | Mo | W | Fe | Co |
|------------------|------|------|-------|------|------|------|------|----|
| H13 钢 | 0.36 | 1.00 | 5.14 | 0.34 | 1.37 | — | 余量 | — |
| Fe901 铁基粉末 | 0.15 | — | 13.00 | — | 0.80 | — | 余量 | — |
| Stellite 12 钴基粉末 | 1.45 | 2.00 | 29.00 | 1.00 | 1.00 | 8.50 | 3.00 | 余量 |

斑直径为 $\Phi 4.5$ mm，扫描速度为 $300\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，搭接率为 50%，送粉量为 $13.5\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ，载气量为 $5\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Stellite 12 钴基粉末的熔覆工艺为：激光功率为 1600 W，光斑直径为 $\Phi 4$ mm，扫描速度为 $400\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，搭接率为 30%，进粉量为 $12\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ，载气量为 $5\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.2 实验设备

实验设备采用德国 TRUMPF 公司熔覆设备，主要包括：Tru-disk12002 碟片式光纤激光器，光斑直径为 $\Phi 4$ mm，最大输出功率为 12 kW；GTV-PF2/2 送粉器，通过调节转速控制送粉量的大小；机床型号为 TruLaser Cell 3000，具有高度的柔性，可以进行离线编程；熔覆喷嘴为型号 SO16 的三孔同轴送粉喷嘴，离焦量为 16 mm，适用粉末直径为 $\Phi 45 \sim \Phi 90\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0^\circ \sim 90^\circ$ 连续变姿态下的熔覆工艺。实验设备如图 1 所示。

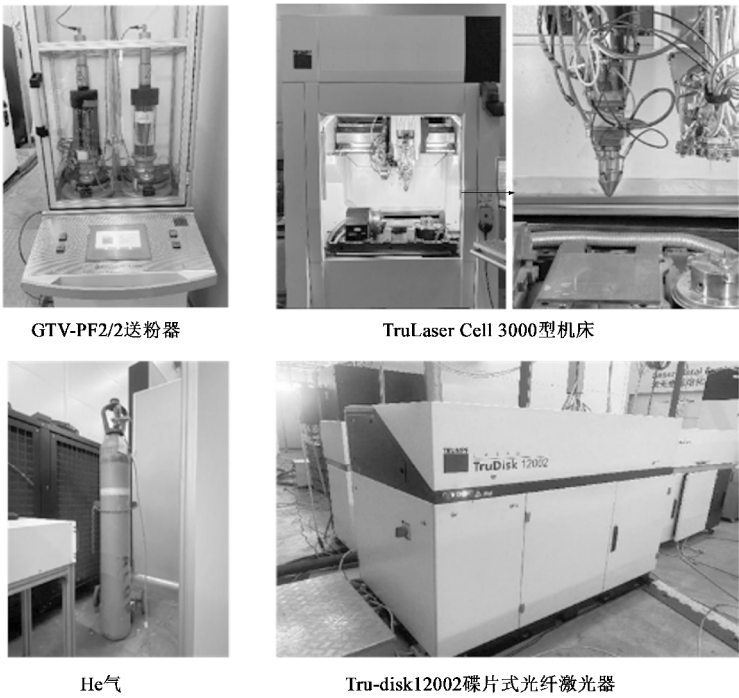


图 1 实验用激光熔覆设备

Fig. 1 Laser cladding devices used in experiment

摩擦磨损装置为江苏大学智能成形与装备技术研究所自研的差温往复摩擦磨损实验机,如图2所示^[13]。底部安装有加热装置,可复现真实工况下钢板的高温状态;上部销内部设计有冷却水道,并且在加热装置和上部销中安装有热电偶 A、B 以监控温度,通过温控系统可实现长时间摩擦下温度稳定。摩擦因数 μ 使用库伦摩擦公式进行计算,如式

(1) 所示。

$$\mu = \frac{F_X}{F_N} \quad (1)$$

式中: F_N 为 Z 轴力传感器所获得的摩擦实验载荷压力; F_X 为 X 轴力传感器所获得的摩擦力。

激光熔覆销通过铣削加工表面保留厚度为 1 mm 的熔覆强化层。

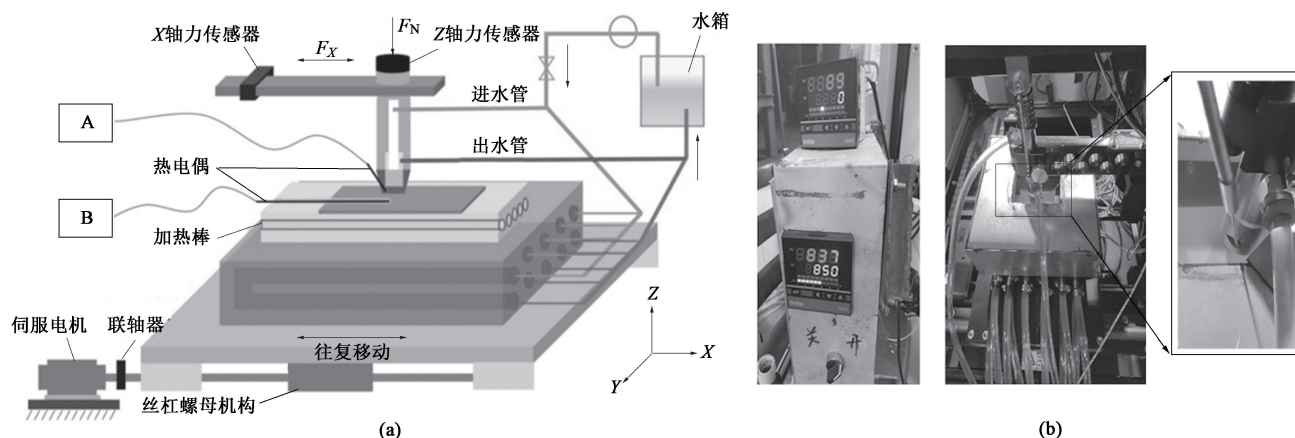


图 2 差温往复摩擦磨损装置

(a) 装置原理图 (b) 装置实际工作状态

Fig. 2 Friction and wear device of differential temperature reciprocating

(a) Principle diagram of device (b) Actual working state of device

后续通过日本 Hitachi 厂家的 S-3400N 型可变真空钨灯丝扫描电镜及配套的美国 EDAX 厂家的 X 射线能谱仪进行表面形貌观测与元素分析。

2 结果与讨论

2.1 复杂型面激光熔覆

凹形型面是模具中最常见的形状。对凹形件内部进行表面强化时,喷嘴容易与待加工模具轮廓碰撞干涉,需要优化喷嘴姿态。通过离线编程软件

Lasertools 2022 进行编程,使用的测试模具如图 3a 所示,获得扫描路径,激光熔覆头轨迹如图 3b 所示,加工过程中尽量保持熔覆头与模面垂直状态下进行送粉。

由于模具型面的法矢量不断变化,熔覆头需要不断地改变姿态以保证接近标准熔覆姿态。但通过仿真发现熔覆头与复杂型面出现了干涉。为了解决干涉碰撞问题,调整熔覆头姿态将干涉点转化为有效点,如图 4 所示。

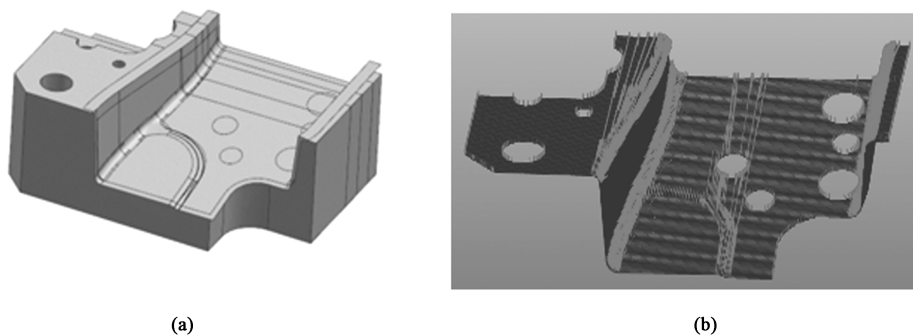


图 3 复杂型面激光熔覆路径仿真

(a) 测试模具 (b) 熔覆路径

Fig. 3 Simulation of laser cladding path for complex surface

(a) Testing die (b) Cladding path

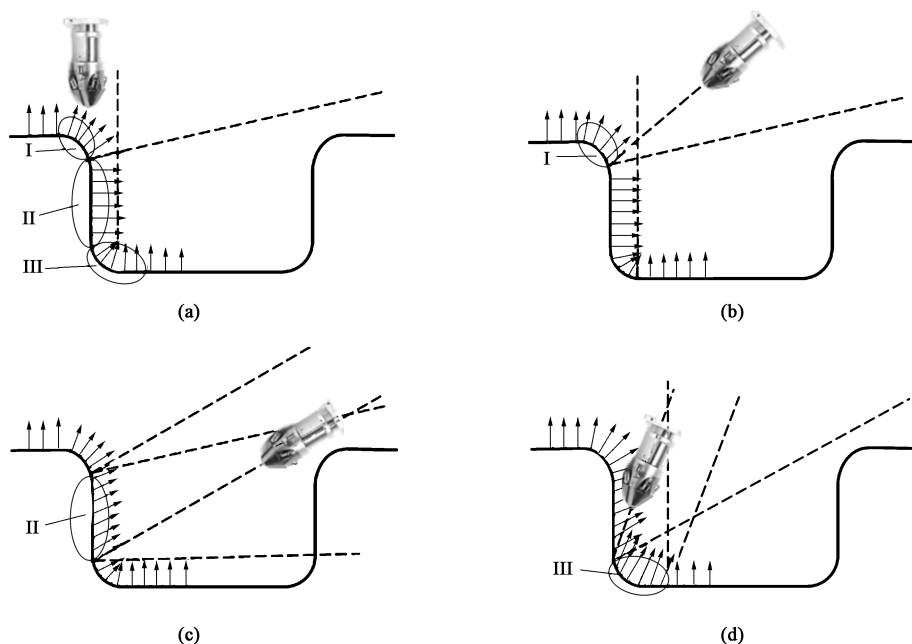


图4 复杂型面激光熔覆的干涉检测及位置修正

(a) 凹形件曲面干涉区域划分 (b) 区域 I 凸圆角 (c) 区域 II 侧壁 (d) 区域 III 凹圆角

Fig. 4 Interference detection and position correction in laser cladding for complex surface

(a) Division of interference regions for concave part (b) Convex fillet corner in region I (c) Side wall in region II (d) Bottom concave corner in region III

进行干涉碰撞姿态修正: 将干涉碰撞区域划分为不同的子区域 (I~III), 每个子区域保持一致的熔覆头姿态, 只改变相邻子区域的姿态方向, 提高加工过程稳定性。由图 4c 和图 4d 可以看到干涉区不同子区域的轨迹点, 其加工方向不再与模具型面的法矢量重合, 但为了满足熔覆质量要求, 对姿态调整阈值设定范围。对得到的无干涉熔覆扫描路径进行加工过程仿真, 如图 5 所示, 未出现干涉碰撞情况。

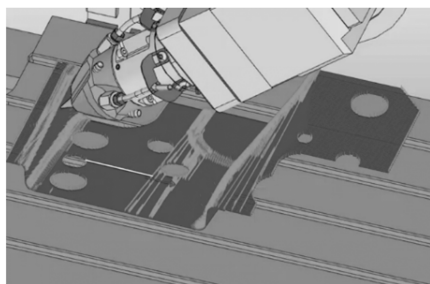


图5 最优轨迹加工过程仿真

Fig. 5 Simulation of optimal trajectory processing process

在对复杂型面的倾斜区域进行加工时, 重力、黏性剪切力与表面张力的共同作用会使熔池形状不规则, 且熔覆头进行大角度倾斜会造成送粉粉末汇聚性差, 从而导致熔覆层质量欠佳。为了解决以上问题, 可通过机械手 (熔覆头) 与变位机变姿, 使

得每一个加工轨迹点的熔覆头轴线与曲面法矢量尽量一致, 以达到运动的平稳性, 利用变位机将熔池转动至近似水平状态, 如图 6 所示。

为验证规划出的路径在实际应用中的可行性, 对复杂镶块模具型面, 运用上述路径规划方法进行验证。强化前后的表面形貌如图 7 所示, 从图 7 中可以看出, 获得的熔覆层表面形貌和强化前形貌完美贴合且形貌均匀、无粘粉和积瘤现象, 通过渗透探伤检测, 未出现裂纹和气孔。再次验证了路径规划方法在实际应用中的可行性。

2.2 激光熔覆层摩擦磨损控制

激光熔覆层具有很好的减摩作用, 从图 8a 可以看出, 淬火 H13 钢的摩擦因数逐渐从初始的 0.37 上升并稳定在 0.48 左右, 整个摩擦过程较为平稳。在前 500 次往复摩擦中, Fe901 铁基粉末激光熔覆层的摩擦因数从 0.32 增加至 0.42 并在 0.37 左右大幅度波动; 而在后 500 次往复摩擦中, 摩擦因数上升至 0.45 左右且波动幅度逐渐增大。Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层是三者中摩擦因数最低且最稳定的, 从 0.23 增加至 0.35 最终稳定在 0.38 左右。从摩擦因数来看, Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层具有最好的减摩作用。从图 8b 分析可知, 激光熔覆层能减少 50% 以上的磨损, 而钴基粉末熔覆层较铁基

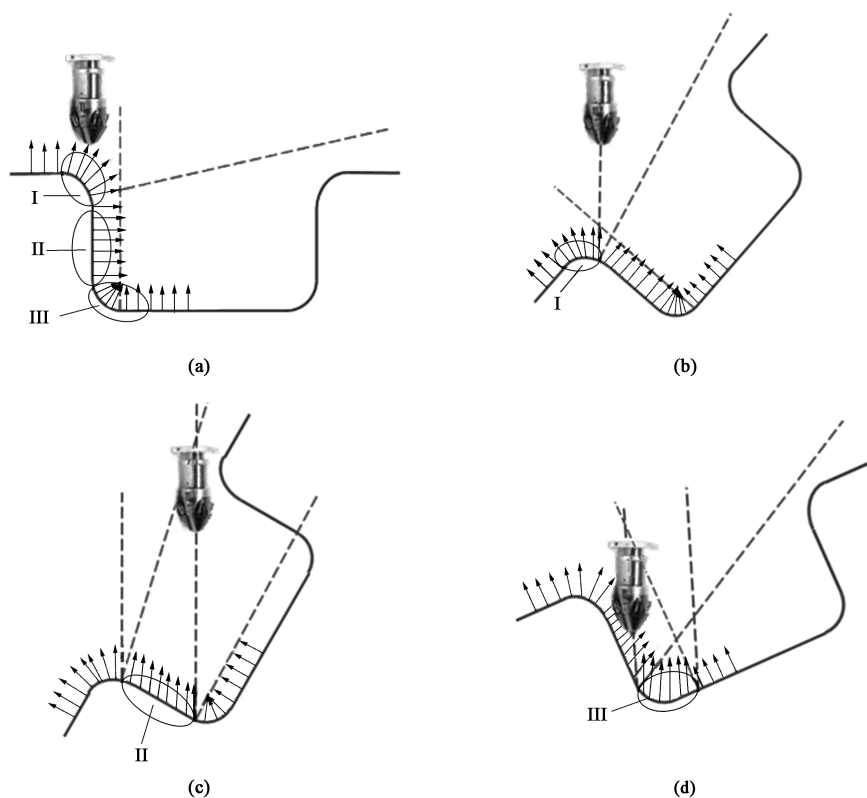


图 6 机械手与变位机的协调运动

(a) 凹形件变位机转动区域划分 (b) 区域 I 凸圆角 (c) 区域 II 侧壁 (d) 区域 III 凹圆角

Fig. 6 Coordinated motion of manipulator and positioner

(a) Division of positioner rotation regions of concave part (b) Convex fillet corner in region I (c) Side wall in region II (d) Bottom concave corner in region III

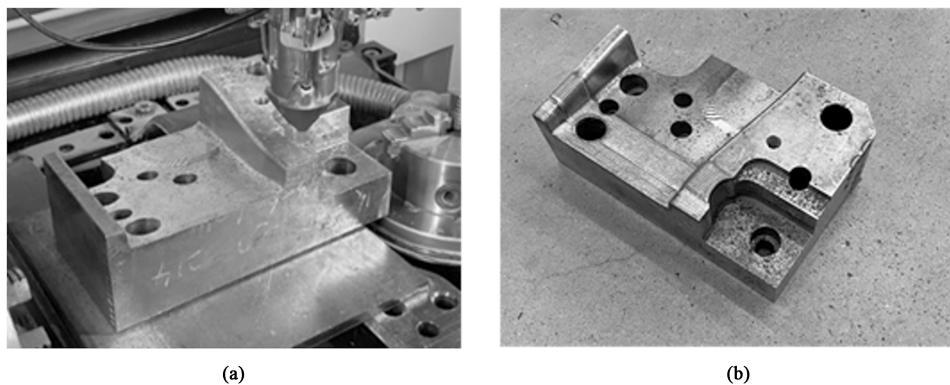


图 7 激光熔覆强化前后复杂模具型面

(a) 激光熔覆强化前 (b) 激光熔覆强化后

Fig. 7 Complex die surfaces before and after laser cladding strengthening

(a) Before laser cladding strengthening (b) After laser cladding strengthening

粉末熔覆层具有更好的性能,能在降低摩擦因数的同时进一步减小磨损。

图 9 为 H13 钢、Fe901 铁基粉末激光熔覆层和 Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层的表面磨损形貌扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图和能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 图。从

图 9 分析可知, H13 钢磨损表面出现大量磨痕, EDS 数据分析出现少量黏着。Fe901 铁基粉末激光熔覆层磨损表面形成了致密的氧化层,使得摩擦因数降低但氧化层出现明显的破坏痕迹,这可能是由于铁氧化层较硬容易破坏形成磨粒,这与摩擦因数中不断波动的现象符合。

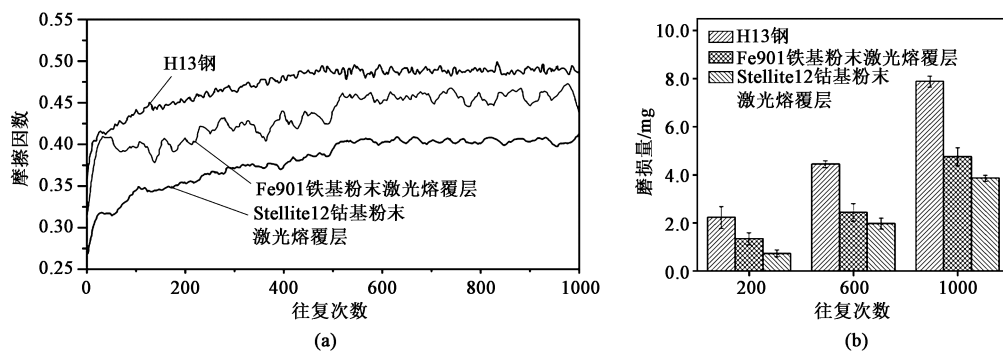


图8 1000次往复摩擦后3种材料的平均摩擦因数(a)和磨损量(b)

Fig. 8 Mean friction factors (a) and wear amounts (b) for three kinds of material after 1000 times of reciprocating friction

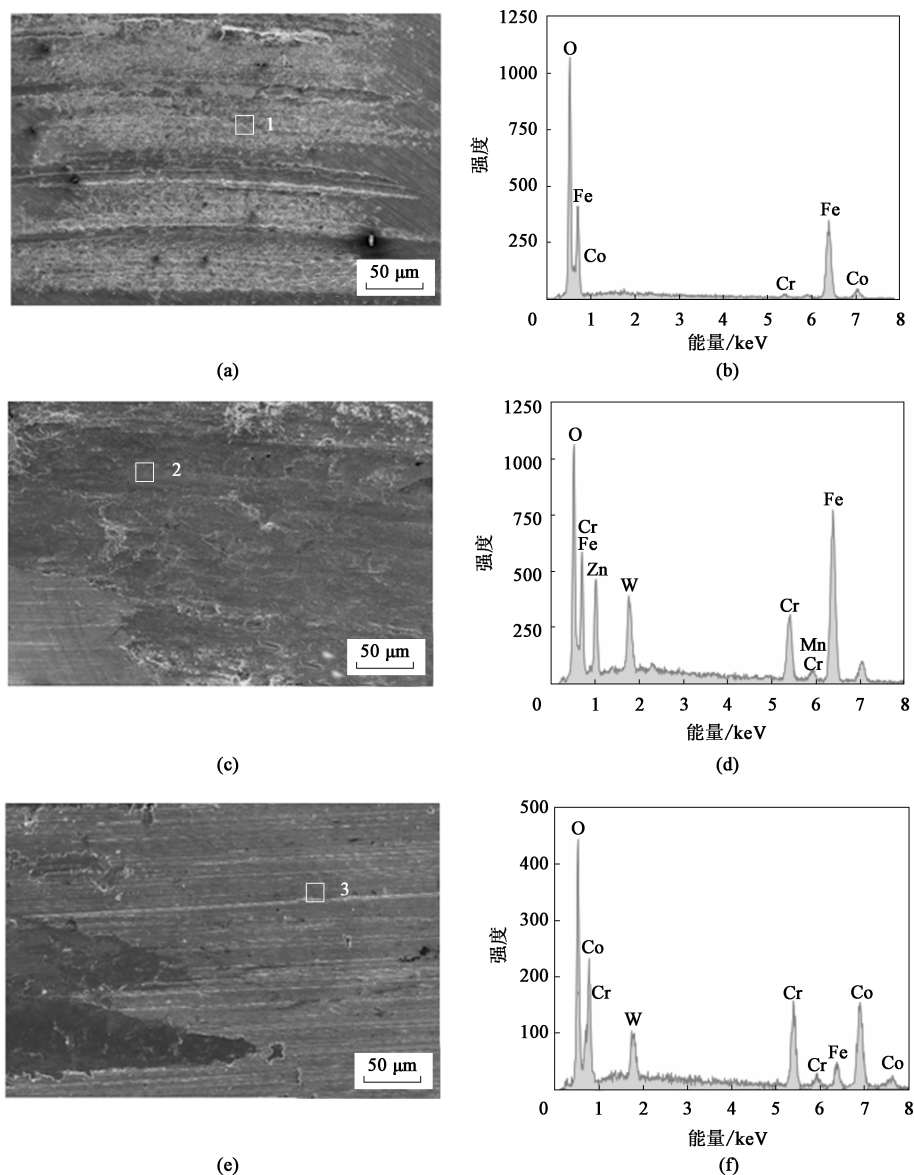


图9 表面磨损后的SEM和EDS图

(a) H13 钢, SEM图 (b) 区域1处的EDS图 (c) Fe901铁基粉末激光熔覆层, SEM图
(d) 区域2处的EDS图 (e) Stellite 12钴基粉末激光熔覆层, SEM图 (f) 区域3处的EDS图

Fig. 9 SEM and EDS diagrams after surface wear

(a) H13 steel, SEM diagram (b) EDS diagram of region 1 (c) Laser cladding layer of Fe901 Fe-based powder, SEM diagram
(d) EDS diagram of region 2 (e) Laser cladding layer of stellite 12 Co-based powder, SEM diagram (f) EDS diagram of region 3

Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层磨损表面存在较浅划痕, EDS 数据说明表面存在许多钴化合物, 起到了润滑作用。激光熔覆层表面出现的氧化保护膜避免了高温板料与模具钢的直接接触, 保护了模面, 从而减小了磨损。

图 10 对 3 种不同的磨损截面进行了分析, 其中 Line 1~Line 3 为 EDS 线扫分析位置。分析图 10 可知: H13 钢磨损截面出现明显的塑性变形层, 且表面未出现氧化保护层; Fe901 铁基粉末激光熔覆层

磨损截面顶部出现较厚的氧化保护层, 起到了很好的润滑作用, 但明显看出氧化层产生了塑性变形, 较易剥落; Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层磨损表面出现较薄的氧化层, 并出现了较多的钴化合物, 有效地减小了磨损。

3 结 论

(1) 熔覆头与变位机的协同变姿能有效解决复

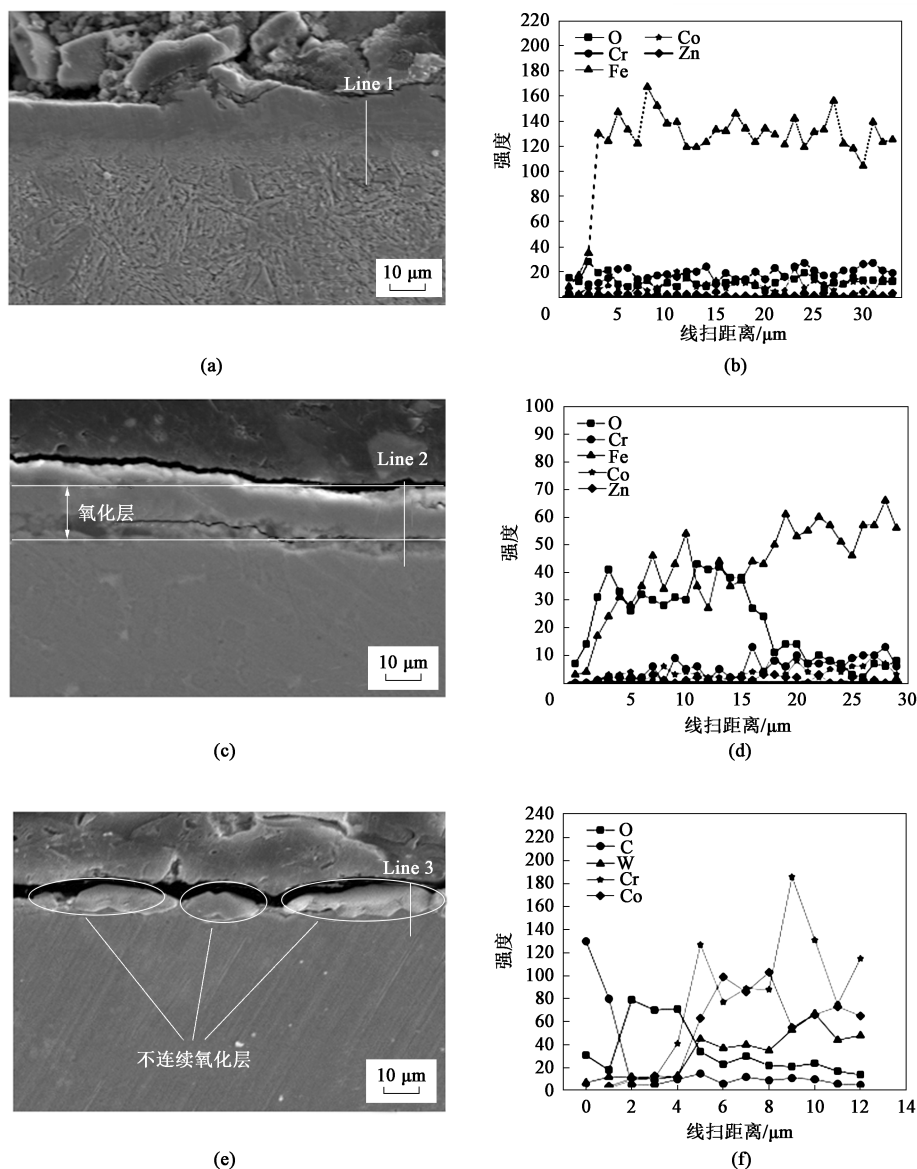


图 10 磨损截面 SEM 图与氧化层截面 EDS 线扫分析

(a) H13 钢, SEM 图 (b) Line 1 的 EDS 分析结果 (c) Fe901 铁基粉末激光熔覆层, SEM 图 (d) Line 2 的 EDS 分析结果
(e) Stellite 12 钴基粉末激光熔覆层, SEM 图 (f) Line 3 的 EDS 分析结果

Fig. 10 SEM diagrams of wear cross-section and EDS line-scanning analysis of oxide layer cross-section

(a) H13 steel, SEM diagram (b) EDS analysis result of Line 1 (c) Laser cladding layer of Fe901 Fe-based powder, SEM diagram
(d) EDS analysis result of Line 2 (e) Laser cladding layer of stellite 12 Co-based powder, SEM diagram (f) EDS analysis result of Line 3

杂模具曲面随形熔覆强化出现的熔覆头干涉、熔池流动等问题。

(2) 较淬火 H13 钢, 铁基粉末激光熔覆层能降低 10% 摩擦因数, 钴基粉末激光熔覆层能降低 20% 摩擦因数, 并且两种熔覆层均能减少 50% 的磨损量。

(3) 激光熔覆层能使得 H13 钢表面的磨损机制从磨粒磨损与黏着磨损转化为氧化磨损, 激光熔覆层表面的氧化物和化合物起到了润滑作用, 有效避免了模具钢与高温板料的直接接触, 从而降低了熔覆层在热冲压工况下的磨损量。

参考文献:

- [1] 李爽. 新型热冲压模具钢组织与高温摩擦磨损机理研究 [D]. 上海: 上海大学, 2017.
- Li S. The Study on Microstructure and High Temperature Friction and Wear Mechanism of New Type Hot Stamping Die Steel [D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.
- [2] 陈雪岩. 基于 CAE 的冲压模具失效分析及再制造修复研究 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2018.
- Chen X Y. Research on Failure Analysis and Remanufacturing Repair of Stamping Die Based on CAE [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2018.
- [3] Ferreira D F S, Vieira J S, Rodrigues S P, et al. Dry sliding wear and mechanical behaviour of selective laser melting processed 18Ni300 and H13 steels for moulds [J]. Wear, 2022, 488-489: 204179.
- [4] Seo J W, Kim J C, Kwon S J, et al. Effects of laser cladding for repairing and improving wear of rails [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20 (7): 1207-1217.
- [5] Chen W, Peng Y C, Wang Y F, et al. Research on high-temperature friction and wear performances of Stellite 12 laser cladding layer against coated boron steels [J]. Wear, 2023, 520-521: 204665.
- [6] 屈海艳, 魏昕, 吴鹏飞, 等. 模具钢表面激光熔覆镍基合金组织及性能的研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (2): 112-115.
- Qu H Y, Wei X, Wu P F, et al. Research on microstructure and properties of laser cladding nickel-based alloy on die steel surface [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (2): 112-115.
- [7] 刘立君, 冯梦奎, 王晓陆, 等. 超声辅助 H13 模具钢表面激光熔覆强化层组织分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42 (6): 85-90, 96, 102.
- Liu L J, Ma M K, Wang X L, et al. Microstructure analysis of laser cladding strengthening layer on H13 die steel surface assisted by ultrasonic [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42 (6), 85-90, 96, 102.
- [8] 任德亮, 林齐, 李婷, 等. 冷作模具曲面激光熔覆修复工艺及路径研究 [J]. 表面技术, 2018, 47 (3): 54-60.
- Ren D L, Lin Q, Li T, et al. Laser cladding repair technology and path of cold-worked dies [J]. Surface Technology, 2018, 47 (3): 54-60.
- [9] 黄勇, 孙文磊, 陈影, 等. 曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法 [J]. 中国表面工程, 2017, 30 (5): 150-158.
- Huang Y, Sun W L, Chen Y, et al. Rapid processing path generation method for curved surface plastic mold remanufacturing by laser cladding [J]. China Surface Engineering, 2017, 30 (5): 150-158.
- [10] 王鑫龙. 失效零件几何形貌检测与激光熔覆可修复性研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- Wang X L. Research on Geometry Detection and Laser Cladding Repairability of Failure Parts [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [11] Bourahima F, Helbert A L, Rege M, et al. Laser cladding of Ni based powder on a Cu-Ni-Al glassmold: Influence of the process parameters on bonding quality and coating geometry [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1018-1028.
- [12] Calleja A, Tabernero I, Ealo J A, et al. Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74 (9-12): 1219-1228.
- [13] 曹鹏. 镀层超高强钢板与热冲压模面间的摩擦磨损行为研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- Cao P. Research on Friction and Wear Behavior Between Coated Ultra-high Strength Steel and Hot Stamping Dieface [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”, 旨在加强刊物与读者的交流, 促进刊物质量的提高, 并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求: 内容填写完整、没有遗漏, 提供的信息准确、详细, 字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整, 字迹不清、无法辨认, 通讯地址模糊、不详细等, 编辑部将不予邮寄杂志, 特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登, 位置在正文后, 请读者注意查看, 以免遗漏。

《锻压技术》编辑部