

Fe901 激光熔覆层界面结合强度及断裂行为

陈 炜¹, 王泽铭¹, 曹一枢², 张小计², 张 威², 陈春刚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: 为了研究 H13 热作模具钢再制造后基材与 Fe901 熔覆层的界面结合强度, 以界面抗剪强度为指标对其进行了定量表征, 分析了熔覆层各部分的显微组织, 对断口形貌及断裂机制进行了分析, 并利用有限元分析方法对界面的各种应力分布规律进行了分析。结果表明: 熔覆层与基材形成了良好的冶金结合; 最高界面抗剪强度为 804.75 MPa, 平均抗剪强度为 779.73 MPa; 通过断口形貌分析, 界面的断裂类型为韧窝-准解理断裂的混合断裂形式; 有限元分析表明, 在剪切过程中界面的边缘存在较大的应力集中。熔覆层与基材具有很高的界面结合强度, 在剪切过程中界面边缘由于发生较大的变形而导致应力集中, 最先产生裂纹, 导致界面破坏, 进而发展为整个熔覆层断裂。

关键词: 激光熔覆层; 界面结合强度; 界面抗剪强度; 断口形貌; 断裂机制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.020

中图分类号: TG76

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0144-07

Interfacial bonding strength and fracture behavior for Fe901 laser cladding layer

Chen Wei¹, Wang Zeming¹, Cao Yishu², Zhang Xiaojie², Zhang Wei², Chen Chungang²

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

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

Abstract: To study the interface bonding strength between substrate and Fe901 cladding layer after remanufacturing of H13 hot mold steel, it was quantitatively characterized with the interfacial shear strength as the index, and the microstructure of each part for the cladding layer was analyzed. Then, the fracture morphology and the fracture mechanism were analyzed, and the various stress distribution laws of the interface were analyzed by finite element analysis method. The results show that the cladding layer and the substrate form a good metallurgical bonding, the highest interfacial shear strength is 804.75 MPa, and the average shear strength is 779.73 MPa. Through the fracture morphology analysis, the fracture type of the interface is a mixture fracture form of dimples and quasi-cleavage fracture. Finite element analysis shows that there is a large stress concentration at the edge of the interface during the shearing process. The cladding layer and the substrate have a very high interface bonding strength. During the shear process, the stress concentration occurs at the edge of the interface due to large deformation, and the cracks are first produced to cause the interface destruction, and then develop into the fracture of the entire cladding layer.

Key words: laser cladding layer; interfacial bonding strength; interfacial shear strength; fracture morphology; fracture mechanism

热锻模具常服役于高温、高载荷等严苛的工况

下, 模具工作表面很容易产生失效情况。激光熔覆技术作为再制造加工技术^[1]和表面强化技术^[2]中被广泛使用的手段, 常用于热作模具的修复和强化^[3], 具有粉末材料体系齐全、对基材适应性好、加工变形小以及绿色环保等优点^[4-5]。在激光熔覆过程中, 熔覆层的性能对熔覆件甚至是整个设备的服役寿命起着关键性作用^[6]。激光熔覆的早期研究

收稿日期: 2022-11-02; 修订日期: 2023-02-06

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

作者简介: 陈 炜(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: chen_wei@ujs.edu.cn

[11] 蒋浩, 廖宇轩, 李光耀, 等. 碳纤维-铝合金电磁铆接工艺及性能研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 37-44.

Jiang H, Liao Y X, Li G Y, et al. Study on process and mechanical properties of CFRP/Al electromagnetic riveted structures[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 37-

44.

[12] Qin D L, Chen C. Failure behavior and mechanical properties of novel dieless clinched joints with different sheet thickness ratios[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(3): 3077-3087.

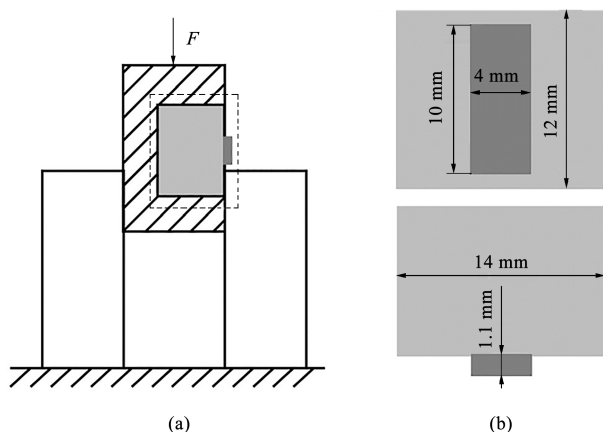


图 2 剪切装置结构简图 (a) 和剪切试样尺寸 (b)
Fig. 2 Structure diagram of shear device (a) and sizes of shear specimen (b)

面积, mm^2 。

1.4 有限元模拟

运用有限元分析软件 Workbench, 对熔覆层剪切过程中的界面应力分布情况进行静力学分析。对模型进行网格划分, 并对接触面进行细化 (图 3a)。

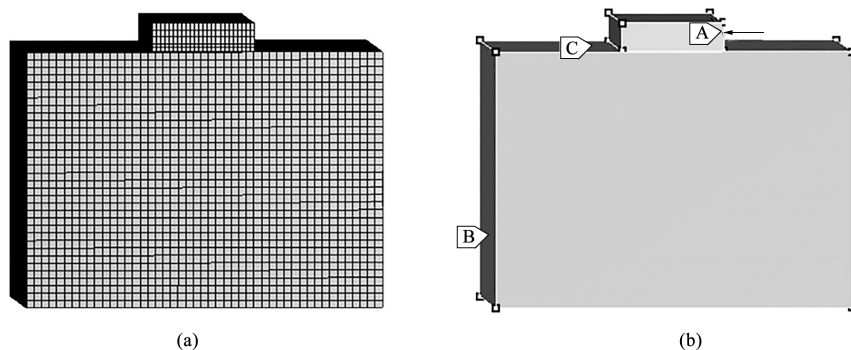


图 3 熔覆层试样的三维模型
(a) 网格划分 (b) 边界条件设置
Fig. 3 3D model of cladding layer specimen
(a) Grid meshing (b) Boundary condition setting

和柱状晶的混合晶区。如图 4c 所示, 在熔覆层顶部, 液相在受到空气、基材和保护气的多重冷却下, 温度梯度 G 最小, 冷却速度最快, 凝固速率 R 也最快, 此时 G/R 达到最小, 所以形成了细小的等轴晶。如图 4d 所示, 在熔覆层搭接区以及搭接面附近, 晶粒的生长形态发生了明显的变化。这是由于相互搭接的熔覆层前后时间间隔很小, 后一道激光的热输入与搭接区的余热共同作用, 导致靠近搭接面区域的热流方向存在差异, 影响枝晶生长的方向, 所以, 靠近搭接面的非搭接区域的树枝晶交错生长, 方向不一 (图 4e), 这也在一定程度上阻碍了裂纹的产生。由于前一道熔覆为后一道的基材提供了

根据试验的实际装夹情况设置模型的边界条件: B 处与 C 处分别限制水平与竖直方向的移动, A 处分布有 500 MPa 的均布载荷 (图 3b 箭头所示)。模型的材料参数为: 设定基材的泊松比为 0.3, 弹性模量为 100 GPa, 密度为 $7.8 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$; 由于熔覆层材料的硬度比 H13 钢基材高得多, 所以设定泊松比为 0.25, 弹性模量为 200 GPa。

2 结果与讨论

2.1 熔覆层微观组织

熔覆层的显微组织形貌如图 4 所示。图 4a 中可以看出, 熔覆层到基材组织过渡平缓, 无明显的分界, 说明熔覆层与基材形成了良好的冶金结合, 由于基体的温度低, 熔池的温度高, 熔覆层与基体的温度梯度 G 最大, 凝固速率 R 最小, 此时 G/R 最大, 形成生长缓慢的平面晶。如图 4b 所示, 在熔覆层中部, 液相的温度梯度 G 相对减小, 而凝固速率 R 增大, 所以导致 G/R 减小, 因此形成了树枝晶

预热, 搭接区的温度梯度较小且通过搭接面将热量传递至上一道熔覆层中, 导致搭接区靠近搭接面的区域形成垂直于搭接面生长的细小柱状晶, 而远离搭接面的区域则受搭接面的影响较小, 形成细小的等轴晶^[20] (图 4f)。

2.2 熔覆层抗剪强度

对熔覆层进行多次抗剪强度试验, 结果如表 3 所示, 其中熔覆层的最小抗剪强度为 763.50 MPa, 最大为 804.75 MPa, 平均抗剪强度为 779.73 MPa。

熔覆层剪切过程中的位移-载荷曲线如图 5 所示, 从图 5 中可以看出, 剪切过程主要分为 4 个阶段: 在 $O'A'$ 段, 剪切刃尚未与熔覆层接触, 此时处

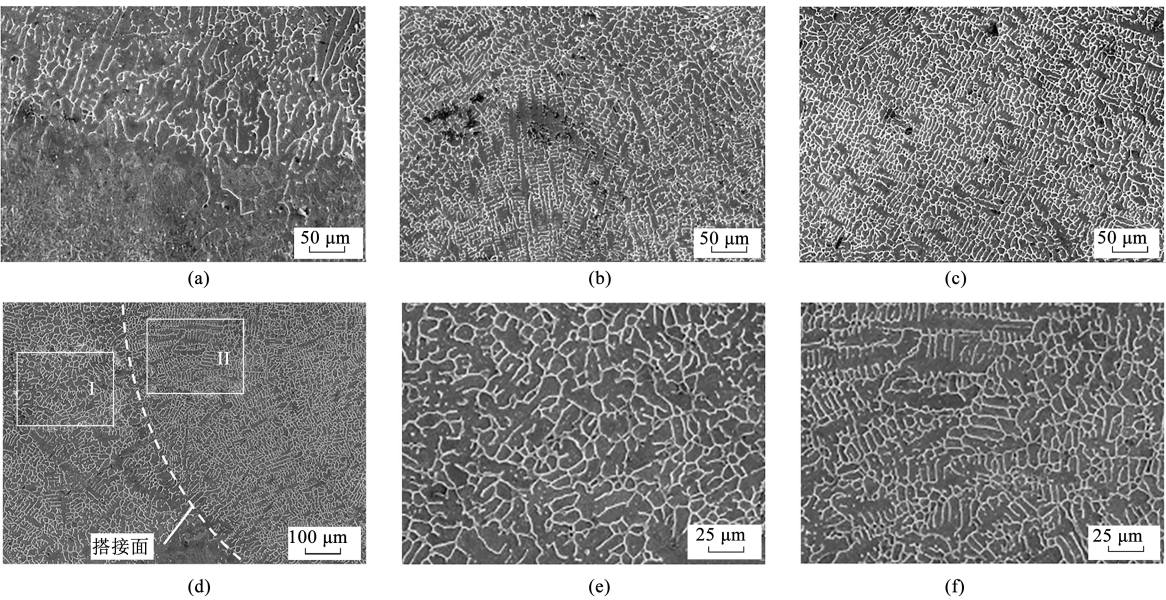


图 4 熔覆层显微组织

(a) 底部 (b) 中部 (c) 顶部 (d) 搭接区及搭接面附近 (e) 区域 I (非搭接区的搭接面附近) (f) 区域 II (搭接区)

Fig. 4 Microstructures of cladding layer

(a) Bottom (b) Central (c) Top (d) Overlapping region and near overlapping surface (e) Region I (Near overlapping surface of non-overlapping region) (f) Region II (Overlapping region)

表 3 熔覆层抗剪强度数据

Table 3 Shear strength data of cladding layer

试样编号	最大剪切载荷 F_{\max}/kN	摩擦力 f/kN	抗剪强度 σ_c/MPa
1	30.89	0.35	763.50
2	31.16	0.30	771.68
3	32.62	0.43	804.75
4	31.40	0.24	779.00

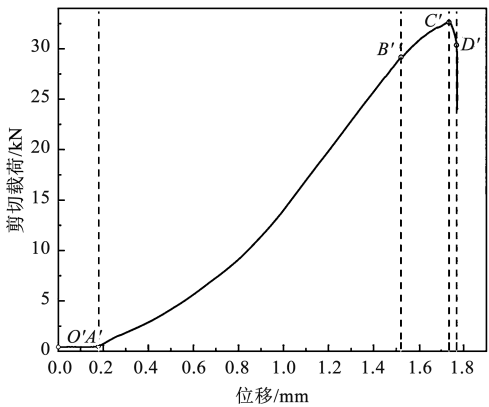


图 5 剪切过程中的位移-载荷曲线

Fig. 5 Displacement-load curve during shearing process

于纯摩擦阶段；在 $A'B'$ 段，剪切刃与熔覆层开始接触，熔覆层逐渐发生变形并产生堆积，因此，载荷处于快速增加阶段，表现为曲线的斜率逐渐增加；

在 $B'C'$ 段，熔覆层的曲线的斜率逐步减小，这是因为：界面处应力达到破坏阈值，开始出现微裂纹，并伴随着微小区域的界面滑移，导致应力累积变慢；在 $C'D'$ 段， C' 点熔覆层受到的载荷达到最大值，此时在熔覆层与基材的界面处的材料发生大面积断裂剥离，最终在 D' 点完全断裂。为了进一步分析熔覆层与基材的断裂机制，采用 SEM 对熔覆层断面形貌进行分析。

图 6 为熔覆层剪切断裂后的断面 SEM 形貌。从宏观断口表面形貌（图 6a）可以看出，断面较为平整，表面分布有较多与扩展方向一致的撕裂棱，从撕裂棱的方向可以判断出，断口边缘区域 1 为断裂的源区，而分布有密集撕裂棱的区域 2 为放射区。图 6b 为断裂源区的微观断面图，其中主要由撕裂棱、平面和台阶组成，同时还存在少量沿微孔聚集的抛物线状的剪切韧窝。图 6c 中放射区存在较多形状相同、大小各异的等轴韧窝和少量台阶平面，韧窝底部可见少量夹杂物，熔覆层整体的断裂形式为韧窝断裂与准解理断裂共存的混合断裂^[21]。断裂源区的材料在达到弹性极限后继续受力产生较大的塑性变形，不同的位置同时产生较多的解理小裂纹，这些解理小裂纹在材料发生塑性变形的过程中不断长大，最终因发生塑性撕裂而将残余部分连接起来，起初产生的解理小裂纹便形成小平面，而后继续以

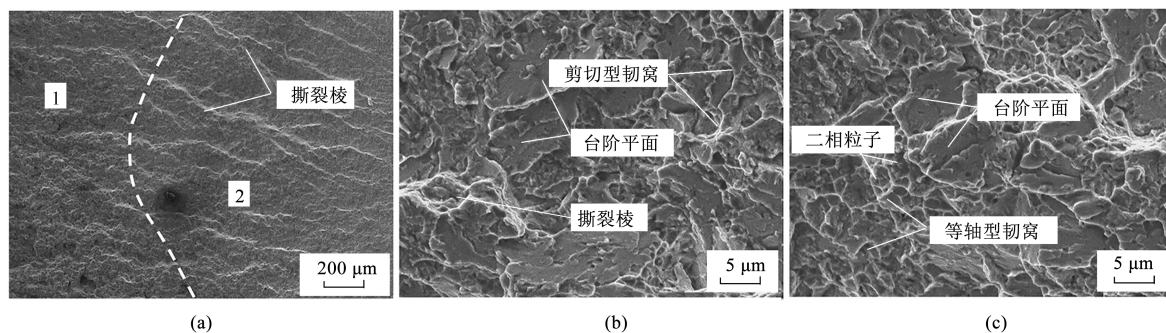


图 6 断面 SEM 形貌

(a) 宏观断口表面 (b) 断裂源区微观形貌 (c) 裂纹扩展区微观形貌

Fig. 6 SEM morphologies of fracture surface

(a) Macroscopic fracture surface (b) Micromorphology of source region for fracture (c) Micromorphology of crack expansion region

塑性方式撕裂的部分则表现为撕裂棱或者韧窝；而在放射区，由于远离载荷施加区域，材料不会发生较大的塑性变形，而是逐渐产生弹性应变，第二相粒子或者夹杂物周围的位错环因为位错堆积应力作用而产生运动，当基体与第二相粒子或者夹杂物之间的界面结合强度不足以抵抗积累的弹性应变能时，就会在周围形成微型空洞，随着应力的增加，微型空洞不断长大增加，直至互相连接而导致断裂。

2.3 有限元模拟分析

图 7 为熔覆层与基材的等效应力分布图，可以看到由于力的传递作用，熔覆层与基材的内部有部分应力存在，但主要分布在熔覆层与基材的界面上，这是因为：在载荷的作用下，熔覆层与基材有相对滑动被剪断的趋势，导致界面出现应力累积。熔覆层与基材界面上的等效应力、正应力和剪应力如图 8 所示。

在图 8 中可以看到，界面上并不是纯剪切状态，

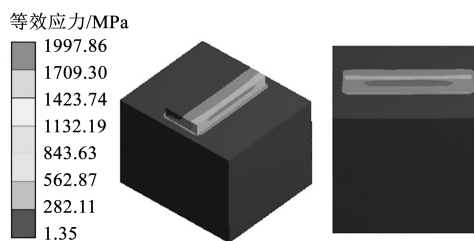


图 7 等效应力分布图

Fig. 7 Distribution diagram of equivalent stress

还存在正应力，这是由于存在弯曲作用，且不同类型的应力沿着结合面的中线呈近似对称分布。在图 8a 和图 8b 中，等效应力与正应力从界面边缘至内部均呈现递减趋势，但在界面内部分布较为均匀，且在施加压力的一侧应力处于最大值。然而，在图 8b 中，两侧界面边缘的区域正应力方向相反，这说明界面受到弯矩的作用，靠近载荷施加的区域产生拉应力，而远离载荷施加的区域产生压应力。在图

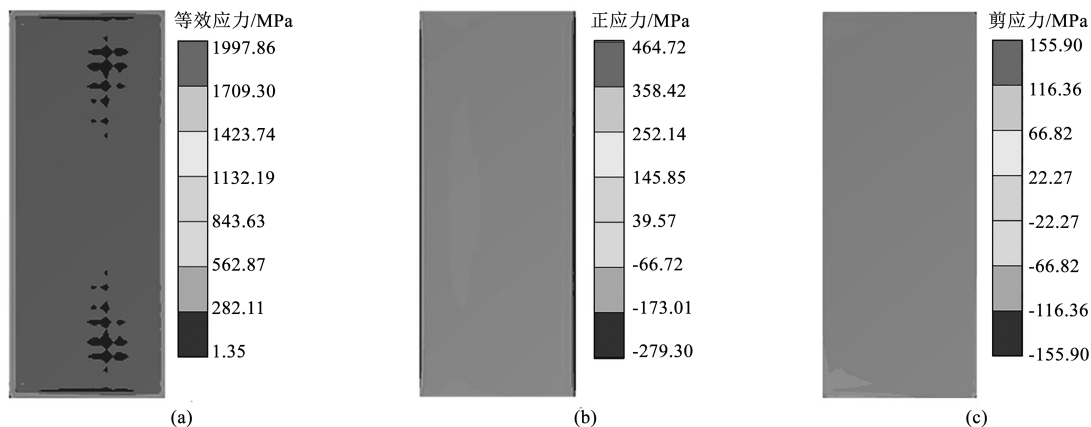


图 8 界面各应力分布图

(a) 等效应力 (b) 正应力 (c) 剪应力

Fig. 8 Stress distribution diagrams of interface

(a) Equivalent stress (b) Normal stress (c) Shear stress

8c 中, 整个界面上的剪应力分布均匀, 仅有边角部分区域内产生相对大的应力集中。综合图 8 来看, 不同类型的应力均在结合面边缘出现应力集中, 此处最先出现裂纹并向中心扩展, 最后发展为断裂。

在结合面上由中心向边缘提取 H、I 和 J 共 3 条路径的等效应力 (图 9), 其应力分布曲线如图 10 所示, 可以看出, 不同路径上的应力曲线呈现相同的变化规律, 均沿着路径方向先减小后增大, 呈现近似 U 形分布。路径 H 与路径 I 的应力分布情况非常接近, 均在起始位置处于峰值状态, 在急剧下降后经过一段较为平缓的过渡, 之后又急剧上升。而路径 J 的应力曲线虽然在峰值处与路径 H 和路径 I 相比较低, 但是在整体上却高于路径 H 和路径 I 且起伏较小, 这说明剪切过程中界面处以剪应力为主, 正应力为辅。这与图 8 中各应力在界面内部应力变化较为均匀而在边缘处出现较大应力集中的结论相一致。

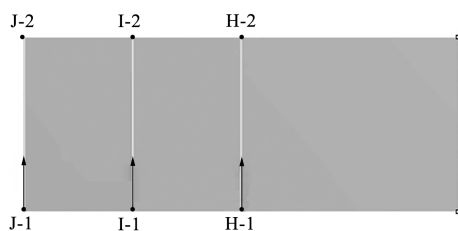


图 9 不同路径的应力提取示意图

Fig. 9 Schematic diagram of stress extraction along different paths

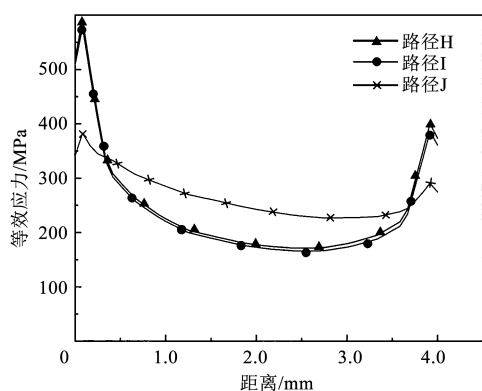


图 10 不同路径的应力分布曲线

Fig. 10 Stress distribution curves along different paths

3 结论

(1) 熔覆层与基材在组织上形成了良好的冶金结合, 熔覆层从底部至顶部依次主要为平面晶、柱状枝晶和等轴晶, 搭接区域的组织由于受到热流的影响, 晶粒的生长形态与方向发生了明显的变化。

(2) 熔覆层与基材具有很高的最高界面结合强度, 最高界面抗剪强度为 804.75 MPa, 平均抗剪强度为 779.73 MPa, 远远高于基材的抗剪强度 (470 MPa); 断面存在断裂源区和放射区, 具有韧窝断裂和准解理断裂特征, 属于混合断裂类型。

(3) 界面应力分布的有限元分析结果表明, 界面断裂是剪应力与正应力共同作用的结果, 各应力在边缘处出现较大应力集中, 这也是在剪切过程中边缘处应力最先达到破坏阈值的原因。

参考文献:

- [1] 刘文浩, 陈燕, 周睿, 等. 再制造加工技术的研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41 (4): 1-7.
Liu W H, Chen Y, Zhou R, et al. Research progress of remanufacturing technology [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41 (4): 1-7.
- [2] 封亚明, 何柏林, 江明明, 等. 表面技术在模具制造和修复中的应用 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 30-34.
Feng Y M, He B L, Jiang M M, et al. Application of surface technology in manufacture and repair of die [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (4): 30-34.
- [3] 李洪波, 高强强, 李康英, 等. 表面激光熔覆 H13/NiCr-Cr3C2 复合粉末熔覆层性能研究 [J]. 中国激光, 2021, 48 (18): 163-172.
Li H B, Gao Q Q, Li K Y, et al. Properties of surface laser cladding H13/NiCr-Cr3C2 composite powder cladding layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 (18): 163-172.
- [4] 谢发勤, 何鹏, 吴向清, 等. 钛合金表面激光熔覆技术的研究及展望 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (4): 1514-1524.
Xie F Q, He P, Wu X Q, et al. Research and prospect of laser cladding technology on titanium alloy surface [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (4): 1514-1524.
- [5] 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.
- [6] 杨班权, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基材材料界面结合强度测量方法的现状与展望 [J]. 力学进展, 2007, (1): 67-79.
Yang B Q, Chen G N, Zhang K, et al. A review on measurement methods for interfacial bonding strength between coating and substrate [J]. Advances in Mechanics, 2007, (1): 67-79.
- [7] Telasang G, Majumdar J D, Padmanabham G, et al. Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered AISI H13 tool steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 1108-1118.
- [8] Wang Y B, Zhao S S, Gao W Y, et al. Microstructure and properties of laser cladding FeCrBSi composite powder coatings with higher Cr content [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (4): 899-905.

- [9] He X, Song R G, Kong D J. Microstructures and properties of Ni/TiC/La₂O₃ reinforced Al based composite coatings by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 117: 18–27.
- [10] 安相龙, 王玉玲, 姜芙林, 等. 搭接率对 42CrMo 激光熔覆层温度场和残余应力分布的影响 [J]. 中国激光, 2021, 48 (10): 95–106.
- An X L, Wang Y L, Jiang F L, et al. Influence of lap ratio on temperature field and residual stress distribution of 42CrMo laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 (10): 95–106.
- [11] Li K Q, Li T, Ma M, et al. Laser cladding state recognition and crack defect diagnosis by acoustic emission signal and neural network [J]. Optics and Laser Technology, 2021, 142: 107161.
- [12] Qi K, Yang Y, Hu G F, et al. Thermal expansion control of composite coatings on 42CrMo by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 397: 125983.
- [13] Dai Q L, Luo C B, You F Y. Crack restraining methods and their effects on the microstructures and properties of laser clad WC/Fe coatings [J]. Materials, 2018, 11 (12): 2541.
- [14] Lin Y H, Ping X L, Kuang J C, et al. Improving the microstructure and mechanical properties of laser clad Ni-based alloy coatings by changing their composition: A review [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2020, 59 (1): 340–351.
- [15] Bidron G, Doghri A, Malot T, et al. Reduction of the hot cracking sensitivity of CM-247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116461.
- [16] 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.
- [17] Karmakar D P, Muvvala G, Nath A K. Effect of scan strategy and heat input on the shear strength of laser clad Stellite 21 layers on AISI H13 tool steel in as-deposited and heat treated conditions [J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 384: 125331.
- [18] 马群双, 李亚江, 王娟, 等. 宽束激光熔覆 Ni60/WC 复合层显微组织及抗剪强度 [J]. 焊接学报, 2016, 37 (12): 49–52.
- Ma Q S, Li Y J, Wang J, et al. Microstructure characteristics and shear strength of wideband laser Ni60 composite coatings reinforced with WC particle [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37 (12): 49–52.
- [19] 王东生, 田宗军, 段宗银, 等. 压片预置式激光多层熔覆厚纳米陶瓷涂层结合性能 [J]. 中国激光, 2012, 39 (2): 66–71.
- Wang D S, Tian Z J, Duan Z Y, et al. Bonding strength of thick nanostructured ceramic coating by squash presetting type laser multi-layer cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39 (2): 66–71.
- [20] 何波, 王晨, 孙长青, 等. 预热下激光沉积 TA15/GH4169 梯度结构各梯度层组织及性能研究 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (1): 19–26.
- He B, Wang C, Sun C Q, et al. Microstructure and properties of gradient layers of laser deposited TA15/GH4169 gradient composite structure under preheating [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (1): 19–26.
- [21] 钟群鹏, 赵子华. 断口学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Zhong Q P, Zhao Z H. Fractography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2023 年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤

手机: 18811346037

E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652

Http: //www.fstjournal.net

