

预热对 27SiMn 钢激光熔覆热影响区显微组织和力学性能的影响^①

郭长辉¹, 李聪玮^{1,2}, 杨 辉³, 杜双明¹, 刘二勇¹

(1.西安科技大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710054; 2.中国航发西安动力控制科技有限公司,陕西 西安 710082; 3.陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司,陕西 榆林 719314)

摘要: 采用激光熔覆技术在 27SiMn 钢表面制备了铁基熔覆层,考察了预热对 27SiMn 钢热影响区显微组织及力学性能的影响。结果表明,激光熔覆 27SiMn 钢热影响区出现大量马氏体组织;拉伸断裂断口由河流状解理面、撕裂棱及韧窝组成,表现为准解理断裂;预热处理有效减少了马氏体含量,且出现珠光体组织。预热温度 100 °C 时,淬火层硬度下降 25.4%、延伸率提升 11.5%、抗拉强度下降 14.3%。预热温度升高至 300 °C 时,拉伸断裂方式转变为韧性断裂。适当的预热可有效减少 27SiMn 钢热影响区的马氏体组织,缓解淬冷导致 27SiMn 钢的韧性下降问题,提升激光熔覆 27SiMn 钢液压油缸的服役安全性。

关键词: 预热; 27SiMn 钢; 激光熔覆; 铁基熔覆层; 热影响区; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.032

文章编号: 0253-6099(2023)01-0145-05

Effects of Preheating on Microstructures and Mechanical Properties of Heat Affected Zone of 27SiMn Steel After Laser Cladding Process

GUO Changhui¹, LI Congwei^{1,2}, YANG Hui³, DU Shuangming¹, LIU Eryong¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Aero-engine Controls Technology Co Ltd, Xi'an 710082, Shaanxi, China; 3. Shenmu Ningtiaota Mining Co Ltd, Shaanxi Coal Group, Yulin 719314, Shaanxi, China)

Abstract: A Fe-based cladding layer was prepared on the surface of 27SiMn steel by using laser cladding technique, and effect of preheating on the microstructure and mechanical properties of the heat affected zone (HAZ) of 27SiMn steel was investigated. The results show that a large amount of martensite appears in the HAZ of 27SiMn steel after laser cladding process. The tensile fracture is composed of river-pattern cleavage plane, tear edge and dimple, representing a quasi-cleavage fracture; preheating treatment effectively reduces the amount of martensite and brings pearlite structure. When the preheating temperature is 100 °C, the quenched layer has its hardness decreased by 25.4%, elongation increased by 11.5%, and tensile strength decreased by 14.3%. When the preheating temperature rises to 300 °C, ductile fracture occurs in the material under tensile force. Appropriate preheating can effectively reduce the martensite in the HAZ of 27SiMn steel and alleviate the decline in the toughness of 27SiMn steel caused by quenching, thus improving the safety during the service of hydraulic cylinder made of laser clad 27SiMn steel.

Key words: preheating; 27SiMn steel; laser cladding; Fe-based cladding layer; heat affected zone (HAZ); microstructure; mechanical properties

27SiMn 钢是我国自主研发的一种高强钢,具有优良的强韧性能和力学性能,主要用于制造矿用液压支

架和液压油缸等^[1]。通过激光熔覆技术制备铁基熔覆层可显著提升 27SiMn 钢的耐蚀耐磨性能^[2-8]。然

① 收稿日期: 2022-09-09

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021SF-469); 国家自然科学基金(51705415)

作者简介: 郭长辉(1998—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事激光熔覆方面的研究。

通信作者: 刘二勇(1982—),男,陕西西安人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事激光强化与服役安全方面的研究。

而,激光熔覆过程中多次热循环导致 27SiMn 钢热影响区出现组织硬化、晶粒粗大等现象,严重影响 27SiMn 钢的使用性能^[9-15]。

预热、时效等热处理方法能够降低熔覆区域与母材之间的温度梯度,一定程度上降低热影响区的大小和脆硬程度^[16-17]。本文以 27SiMn 钢为基材,利用激光熔覆技术在其表面制备铁基涂层,分析预热处理对 27SiMn 钢激光熔覆热影响区组织与性能的影响,相关研究有望为改善 27SiMn 钢激光熔覆热影响区微观结构和力学性能提供技术支持。

1 实验

选择 27SiMn 钢为基材,利用线切割将 27SiMn 钢加工成 160 mm × 100 mm × 20 mm 试样。随后,用砂纸将基材表面打磨至光亮,用丙酮进行超声清洗并吹干,备用。

选择铁基粉末为熔覆原料,其形貌如图 1 所示,化学成分见表 1。粉末平均粒径 0.12 mm,化学成分以 Fe、Cr 和 Ni 等元素为主。熔覆前在 90 °C 烘干箱中对粉末真空烘干 120 min,备用。

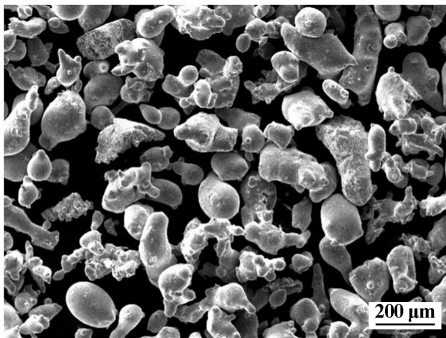


图 1 铁基粉末形貌及粒度分布

表 1 铁基粉末的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Ni	Mo	Fe
0.18	0.89	0.33	≤0.04	≤0.03	0.84	19.28	2.50	0.40	余量

利用激光熔覆设备(西安必盛科技有限公司、BS-OF-3000-15-4F)在 27SiMn 钢表面制备铁基熔覆层。工艺参数为:熔覆功率 3 kW,熔覆速度 6 mm/s,搭接率 40%,送粉量 25 g/min,送粉气体为氮气。27SiMn 钢基材的预热在箱式炉中进行,预热温度分别选取室温、100 °C、200 °C 和 300 °C,随炉升温至预热温度并保温 120 min,预热气氛为空气。

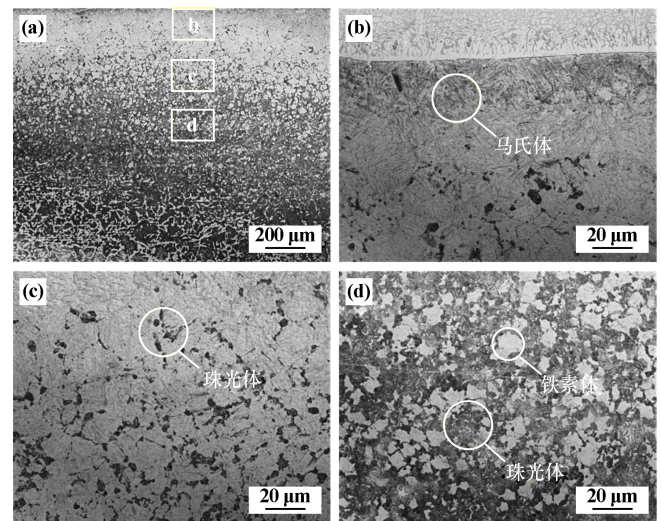
利用电火花线切割沿熔覆层试样横截面切开,并镶样。采用砂纸对试样进行打磨并抛光,采用 4% 硝酸酒精溶液对其进行腐蚀。采用 HVS-1000A 型显微

维氏硬度计测试熔覆层、热影响区、基材硬度,测试条件为载荷 500 g,加载时间 10 s,间隔 0.5 mm,每个位置测量 3 次取平均值;采用奥林巴斯 GX53 倒置式光学金相显微镜(OM)观察微观组织;按照 ASTM E8《金属材料拉伸试验标准》分别制备厚度 1 mm 的熔覆层、热影响区以及基体的拉伸试样,采用 WDW 型电子万能试验机测试 27SiMn 钢激光熔覆层和热影响区的拉伸性能;采用 JSM-6390A 型扫描电镜(SEM)观察断面形貌。

2 实验结果与分析

2.1 预热温度对热影响区显微组织的影响

27SiMn 钢表面激光熔覆铁基熔覆层的热影响区显微组织见图 2。图 2 表明,热影响区的显微组织转变明显,自熔合线向母材方向依次为淬火层、部分淬火层和正火层。淬火层靠近熔合线,熔覆过程中受到的加热温度较高,奥氏体化充分,由于冷却速度较快,组织主要为板条马氏体;部分淬火层由于冷却速度较慢,碳元素不完全扩散形成颗粒状珠光体;而正火层温度较低,冷却过程中奥氏体在 800~500 °C 之间停留时间较长,导致奥氏体转变为大片珠光体和铁素体组织。

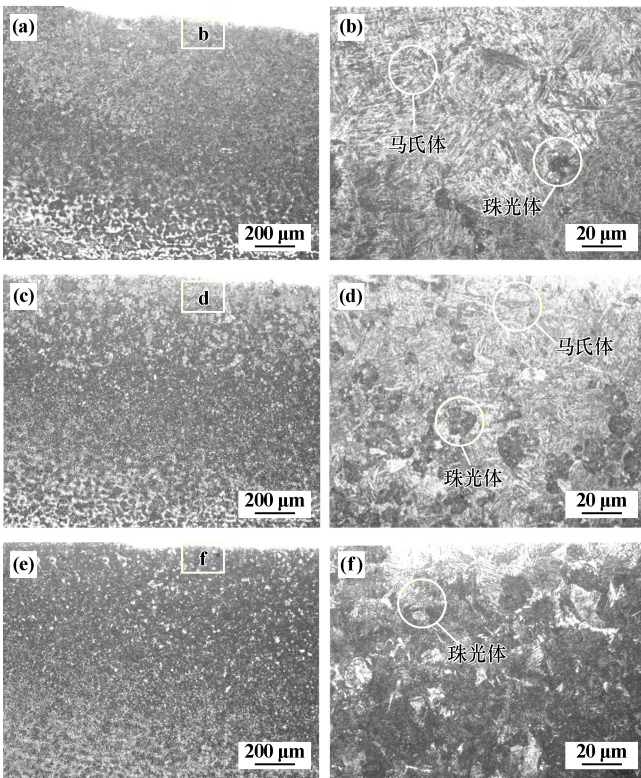


(a) 整体; (b) 淬火层; (c) 部分淬火层; (d) 正火层

图 2 27SiMn 钢热影响区的显微组织

27SiMn 钢基材的预热处理有望通过影响冷却速度来改变热影响区的显微组织,消除因熔覆淬冷出现的马氏体组织。不同预热温度下 27SiMn 钢激光熔覆热影响区的显微组织如图 3 所示。预热温度 100 °C 时,热影响区淬火层显微组织由板条马氏体和少量珠光体组成;预热 200 °C 时,热影响区淬火层的马氏体含量大幅减少,而珠光体和铁素体含量均有不同程度增

加;预热温度达到 300 °C 时,热影响区淬火层的板条马氏体基本消失,出现大量弥散的珠光体团和铁素体,且珠光体组织随着预热温度升高而增多和更加粗大。此外,预热还可以有效减小淬火层宽度。预热温度越高,淬火层宽度越窄,马氏体含量越低,而铁素体和弥散分布的珠光体团增多。这是因为提高预热温度可以减小熔覆层和基体的温度梯度,热影响区冷却速度减小,冷却时间增加,使热影响区的连续冷却过程转变为类等温转变^[18-19],稳定性较差的奥氏体逐渐转变为珠光体和铁素体^[20-21]。



(a), (b) 100 °C; (c), (d) 200 °C; (e), (f) 300 °C

图 3 不同预热温度下 27SiMn 钢激光熔覆热影响区的显微组织

2.2 预热温度对热影响区显微硬度的影响

不同预热温度下 27SiMn 钢激光熔覆层和热影响区显微硬度测试结果如图 4 所示。由图 4 可知,不同预热温度下激光熔覆铁基熔覆层的硬度保持稳定,不随预热温度变化而变化;然而,27SiMn 钢热影响区存在明显淬硬现象,随着距熔合线距离增大,激光熔覆对基体的热作用逐渐降低。因此,距离熔合线越远,热影响区硬度越接近母材,且预热温度越高,热影响区淬火层硬度越低。预热温度 100 °C 时,淬火层硬度为 525.7HV_{0.5},较未预热的淬火层硬度降低了 25.4%;预热温度 300 °C 时,硬度为 365.4HV_{0.5},较未预热的淬火层降低了 50.8%。因此,在激光熔覆前通过对基材预热可以使热影响区

组织发生明显改变,进而影响 27SiMn 钢热影响区的淬硬性^[22-24]。

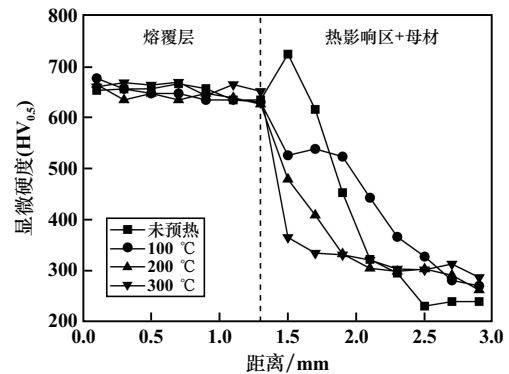


图 4 不同预热温度下热影响区的硬度分布曲线

2.3 预热温度对拉伸性能的影响

27SiMn 钢熔覆层、基体与不同预热温度下热影响区的拉伸性能如图 5 所示。27SiMn 钢具有优异的韧性,延伸率高达 23.31%。经过激光熔覆,铁基熔覆层抗拉强度为 1 281.5 MPa、延伸率为 5.00%,其应力应变曲线未出现典型的拉伸塑性屈服阶段,表明熔覆层脆性较大。预热对热影响区的拉伸性能影响显著,经过 100 °C、200 °C 和 300 °C 预热,热影响区抗拉强度分别为 900.8 MPa、862.9 MPa 和 865.24 MPa,与未经预热的热影响区相比,抗拉强度分别下降了 14.3%、17.9%和 17.6%;预热后的热影响区延伸率分别为 11.5%、11.1%和 8.2%,较未预热的延伸率分别提高了 6.2%、5.8%和 2.8%。预热温度从 100 °C 升高到 200 °C,27SiMn 钢热影响区的延伸率与抗拉强度变化幅度较小;预热温度达到 300 °C 时,27SiMn 钢热影响区的延伸率有较大幅度下降,这是由于在较高预热温度下,高温停留时间延长,珠光体尺寸变大,其塑韧性下降。上述结果表明预热处理显著改变了 27SiMn 钢热影响区的塑性与韧性。

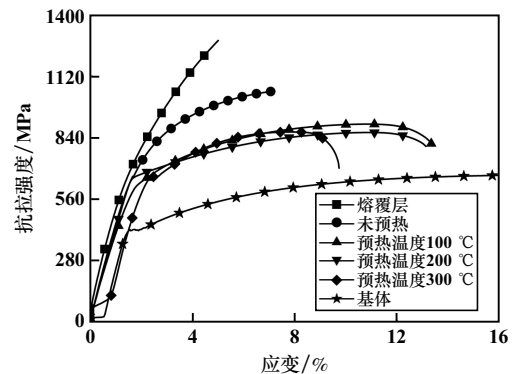
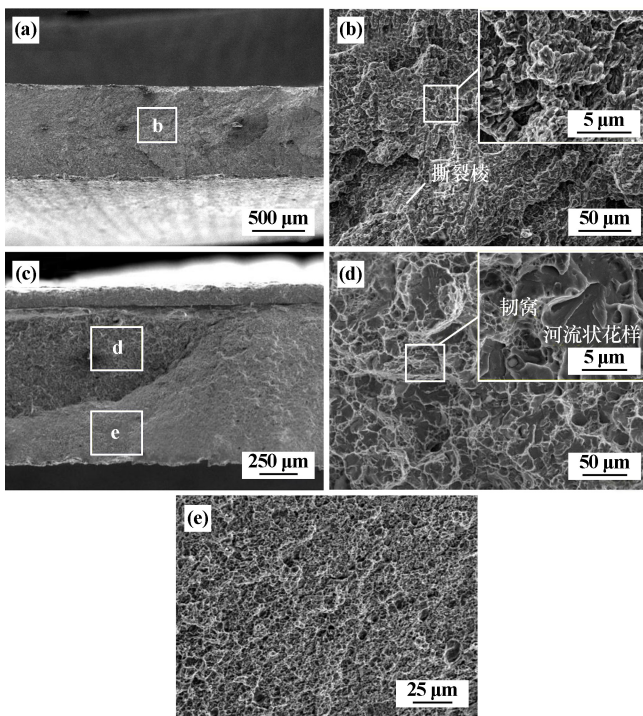


图 5 27SiMn 钢铁基熔覆层、热影响区基体的应力-应变曲线

采用 SEM 对未预热的熔覆层和热影响区的拉

伸断口形貌进行观察,结果如图6所示。熔覆层的拉伸断口宏观形貌表现为断口平坦、无明显塑性变形,高倍断口形貌中可以观察到大量撕裂棱,表现为脆性断裂方式。这是由于熔覆层中树枝晶生长过程中存在偏析,晶间弱化,进而在拉伸过程中裂纹沿晶界开裂并扩展产生脆性断裂^[25]。热影响区宏观断口形貌出现了明显的分层现象;断口上半部分微观形貌由细小的韧窝、河流状花样与撕裂棱组成,断裂方式为典型的准解理断裂特征;下半部分微观形貌由密集细小的韧窝组成,韧性断裂特征显著。这是由于热影响区微观组织由马氏体与珠光体组成,在拉伸过程中,晶粒内部萌生裂纹,从解理台阶逐渐过渡到撕裂棱,形成河流状解理面,且撕裂棱处有较大的变形,在拉伸应力的作用下,第二相粒子与基体界面脱离形成微孔(韧窝)。



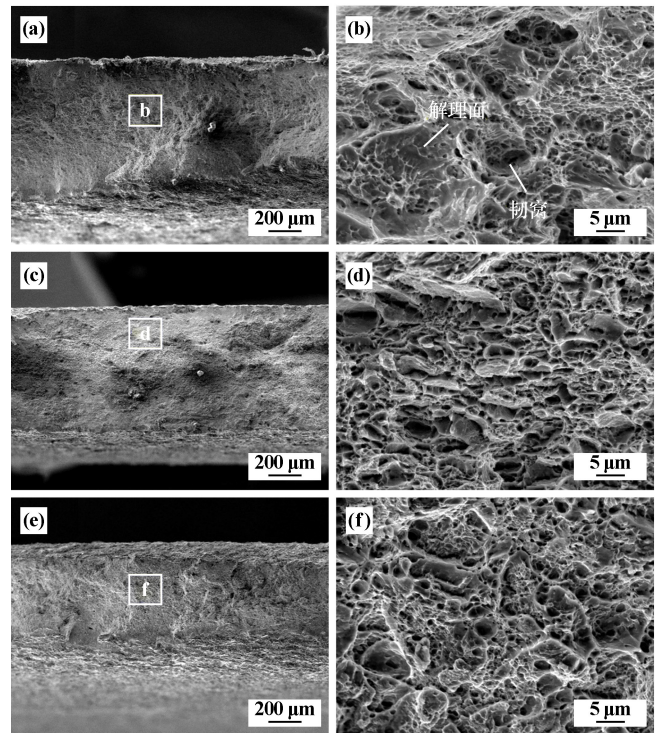
(a) 熔覆层宏观断口; (b) 熔覆层高倍图;

(c) 热影响区宏观断口; (d) 中上部高倍图; (e) 下部高倍图

图6 未预热熔覆层和热影响区的拉伸断口形貌

不同预热温度下 27SiMn 钢热影响区的断口形貌如图7所示。结果表明,不同预热温度下热影响区的断裂方式均为韧窝型断裂。预热温度 100 ℃ 时,热影响区低倍断口表面凹凸不平,高倍断口形貌由韧窝和解理面构成,撕裂棱粗大;预热温度 200 ℃ 时,热影响区低倍断口形貌较平整,高倍断口表面观察到解理面消失,韧窝较预热温度 100 ℃ 时有所增大;预热温度达到 300 ℃ 时,热影响区断口发生了明显的颈缩现象,且高倍断口表面形貌由大量韧窝构成,韧窝数量较预热

温度 100 ℃、200 ℃ 时增多,且韧窝具有更大尺寸,韧性断裂特征更加显著。



(a) 100 ℃ 低倍图; (b) 100 ℃ 高倍图; (c) 200 ℃ 低倍图;

(d) 200 ℃ 高倍图; (e) 300 ℃ 低倍图; (f) 300 ℃ 高倍图

图7 不同预热温度下热影响区的断口形貌

综上所述,预热处理对 27SiMn 钢激光熔覆热影响区的显微组织与力学性能影响明显。经预热处理,27SiMn 钢热影响区温度梯度减小,马氏体含量下降,铁素体和珠光体含量上升,韧性提高,硬度下降,淬硬性得到改善。然而,随着预热温度升高,高温停留时间延长,珠光体尺寸变大,韧性反而降低。因此,适当温度的预热处理可有效调控 27SiMn 钢激光熔覆热影响区的显微组织,进而改善其力学性能。

3 结 论

1) 27SiMn 钢热影响区微观组织由马氏体、珠光体和铁素体组成,马氏体的存在导致热影响区韧性显著降低,拉伸断口呈准解理断裂特性。

2) 预热可以有效改善 27SiMn 钢热影响区的淬硬性。淬火层马氏体组织含量随着预热温度升高而降低;预热温度达到 300 ℃ 时,马氏体组织基本消失,热影响区由弥散的珠光体团和铁素体组成。

3) 预热对 27SiMn 钢热影响区的力学性能影响明显。与未预热热影响区相比,预热温度 100 ℃ 时,预热处理 27SiMn 钢激光熔覆热影响区的淬火层硬度下降 25.4%,延伸率提升 11.5%,抗拉强度下降 14.3%。预

热温度升高至 300 °C 时,热影响区断口微观形貌出现大量韧窝,断裂方式由未预热处理时的准解理断裂转变为韧性断裂。

参考文献:

- [1] WANG Q, QIAN R, YANG J, et al. Effect of High-Speed Powder Feeding on Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based Coatings by Laser Cladding[J]. *Coatings*, 2021, 11(12):1456.
- [2] 杜博睿,王森辉,申博文. 液压支架立柱激光熔覆不锈钢的组织与性能[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(16):71-74.
- [3] OUYANG C Y, BAI Q F, YAN X G, et al. Microstructure and Corrosion Properties of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating on 27SiMn Steel Surface[J]. *Coatings*, 2021, 11(5):552.
- [4] LI L Q, SHEN F M, ZHOU Y D, et al. Comparative study of stainless steel AISI 431 coatings prepared by extreme-high-speed and conventional laser cladding[J]. *Journal of laser applications*, 2019, 31(4):042009.
- [5] LI C Z, NI Y J, WANG M D, et al. Analysis of Microstructure and Performance of Laser Cladding WC-Fe316L Alloy on the Surface of 27SiMn Steel[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2185(1):012083.
- [6] BAI Q F, ZHANG J, LI Q H, et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-based coatings prepared using high-speed laser cladding and powerful spinning treatment[J]. *Materials Letters*, 2022, 310:131429.
- [7] 韩晨阳,孙耀宁,徐一飞,等. 激光熔覆镍基合金磨损及电化学腐蚀性能研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(11):103-110.
- [8] 李聪玮,刘 泽,王 明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5):149-152.
- [9] 庞小通,姚成武,龚群甫,等. 多层激光熔覆对 30CrMnSiNi2A 高强度钢组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6):69-79.
- [10] 郭 洋,张建勋,熊建坤,等. 电站设备转子轴颈等离子弧增材修复的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2020, 41(10):47-53.
- [11] PAN C L, LI X Q, ZHANG R H, et al. Research on microstructural and property evolution in laser clad HAZ[J]. *Surface Engineering*, 2021, 37(12):1514-1522.

- [12] 谭米雪,王 臻,赵凤君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(6):202-206.
- [13] Kwok C T, Man H C, Cheng F T, et al. Developments in laser-based surface engineering processes; with particular reference to protection against cavitation erosion[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 291:189-204.
- [14] 王义猛. 液压油缸活柱表面激光熔覆技术研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(18):137-140.
- [15] XIN D Q, CAI Y, HUA X M. Effect of preheating on microstructure and low-temperature toughness for coarse-grained heat-affected zone of 5% Ni steel joint made by laser welding[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(5):1229-1241.
- [16] Quan L, Ralph A, Yan W, et al. Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-clad hypereutectoid rails[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263:1-20.
- [17] 冯大鹏. 基于 45 钢基体焊前预热对熔合区组织及硬度梯度的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(9):221-223.
- [18] 王海生,王晓南,张 敏,等. 激光焊接热输入对微合金 C-Mn 钢全熔透焊接头组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(1):61-67.
- [19] 李聪玮. 27SiMn 钢表面激光熔覆铁基合金组织和性能研究[D]. 西安:西安科技大学材料科学与工程学院, 2021.
- [20] 韩 浩. 双金属机械复合管端部激光熔覆工艺及焊接接头性能研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东)机电工程学院, 2018.
- [21] 耿吴宾,崔青玲,梁佳伟等. 无钛热冲压成形钢的连续冷却与等温转变规律[J]. *金属热处理*, 2021, 46(12):149-155.
- [22] 唐明华,汪新衡,赵建明. 26CrMoNbTiB 钻杆用钢亚温淬火强化工艺[J]. *金属热处理*, 2018, 43(5):184-189.
- [23] 王 晓,王作成,王协彬,等. 亚温淬火对硼镍添加含镍低合金高强度 H 型钢组织性能的影响[J]. *材料工程*, 2012, 36(3):22-27.
- [24] 胡庚祥,蔡 珣,戎咏华,等. *材料科学基础*[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2006.
- [25] 侯锁霞,任呈祥,吴 超,等. 激光熔覆层裂纹的产生和抑制方法[J]. *材料导报*, 2021, 35(S1):352-356.

引用本文: 郭长辉,李聪玮,杨 辉,等. 预热对 27SiMn 钢激光熔覆热影响区显微组织和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1):145-149.

(上接第 144 页)

参考文献:

- [1] 刘 岷,朱 成. 铝合金用于新能源乘用车车身轻量化及经济性分析[J]. *科技与创新*, 2018(3):20-23.
- [2] 李 坤,王 威,单际国,等. 6061 铝合金激光深熔焊等离子体光谱特征与气孔的相关性[J]. *焊接学报*, 2015, 36(7):72-76.
- [3] 伍 杰,毛祖莉,任芝兰. 汽车轻量化用铝合金拼焊板的研究进展[J]. *锻压技术*, 2016, 41(9):1-6.
- [4] 赵耀邦,张小龙,李中权,等. 铝合金激光焊接技术研究进展[J]. *电焊机*, 2017, 47(2):8-12.
- [5] Kate. Difference Characteristics of the Welding Zone between Laser and TIG Welding[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014(9):36-39.

- [6] 喻 嵘,钟叶清,郑 英. Zn-Cu-Ti 合金搅拌摩擦焊与激光焊接接头组织与性能对比研究[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(3):128-131.
- [7] 杨得帅. 6061 铝合金激光焊接接头组织及力学性能研究[D]. 济南:山东大学材料科学与工程学院, 2014.
- [8] 徐育焱. 6061-T6 铝合金激光焊接接头组织性能及热力耦合研究[D]. 镇江:江苏科技大学材料科学与工程学院, 2019.
- [9] 石康柠,曹 益,梁志敏,等. 6N01 铝合金焊接接头软化现象分析[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(21):185-188.

引用本文: 王 森,李天景,曾一达,等. 6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1):141-144.