DOI:10.19947/j.issn.1001-7208.2023.07.05

30CrMnSiA 钢激光堆焊修复研究

朱兆祺[1] 陈 卓[1] 汪宏斌[2,3]
(1. 上海大学 材料科学与工程学院,上海 200444;2. 上海电机学院 材料学院,上海 201306;
3. 上海海洋高端装备功能型平台有限公司,上海 201306)

【摘要】 采用正交试验对激光焊接工艺进行优化,随后采用不同焊丝对线切割预制深度为 1.2 mm 缺陷的 30CrMnSiA 钢疲劳试样进行激光堆焊修复。采用扫描电子显微镜和疲劳试验机检测了修复后的疲劳试样疲劳性能及其断口特征。结果表明:正交试验获得的最佳激光堆焊修复工艺参数为激光功率 3.4 kW、扫描速度 1.2 m/min 和送丝速度 3.0 m/min;以 440 MPa 的应力水平旋转弯曲疲劳试验时,采用 GH3030 合金焊丝激光堆焊修复的疲劳试样的循环次数大于 10^6,大于采用其他两种焊丝修复的疲劳试样的循环次数,与 30CrMnSiA 钢疲劳试样的循环次数相近,说明 GH3030 合金焊丝最适用于激光堆焊修复 30CrMnSiA 钢。

【关键词】 激光堆焊,30CrMnSiA 钢,正交试验,疲劳性能
中图分类号:TG456$^+$.7 文章编号:1001-7208(2024)06-0065-06

Research on Repairing of 30CrMnSiA Steel with Laser Surfacing Process

ZHU Zhaoqi[1] CHEN Zhuo[1] WANG Hongbin[2,3]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Ocean High-End Equipment Functional Platform Limited Company, Shanghai 201306, China)

【Abstract】 Laser surfacing process was optimized by a orthogonal test, and then the 30CrMnSiA steel fatigue samples in which a type of defect measuring 1.2 mm deep was prefabricated by wire cutting were repaired by laser surfacing with different welding wires. The fatigue property and characteristic of fatigue fracture of the repaired fatigue specimens were detected with the use of scanning electron microscope and fatigue testing machine. The results indicated that (a) the optimal parameters of laser surfacing process reserved for repairing obtained from the orthogonal test were laser power of 3.4 kW, scanning speed of 1.2 m/min, and wire feed speed of 3.0 m/min; (b) in the case of the rotating bending fatigue test being performed at a stress level of 440 MPa, the cycle life of the fatigue sample repaired by the laser surfacing with GH3030 alloy welding wire was more than 10^6 which was larger than that of the fatigue sample repaired with the other two welding wires, and similar to that of the 30CrMnSiA steel fatigue sample, indicating that GH3030 alloy welding wire was the most suitable for repair of 30CrMnSiA steel by laser surfacing.

【Key Words】 laser surfacing, 30CrMnSiA steel, orthogonal test, fatigue property

基金项目:《大型薄壁筒体类合金等温锻件近净成形工艺技术研究》项目(2021-cyxt1-kj27)
作者简介:朱兆祺,男,硕士,主要从事激光增材再制造方面的研究,E-mail:879685453@qq.com
通信作者:汪宏斌,男,教授,主要从事激光增材再制造以及金属材料相变和强韧化等方面的研究,E-mail:whb@shu.edu.cn

近年来,高强钢被广泛应用于基础设施建设、大飞机制造、房屋建造及军工装备制造等领域[1],但使用中损坏的高强钢零件必须进行更换,这将导致金属资源的过多消耗,不符合我国的国策[2]。对损坏的零部件进行再制造已成为降低金属资源消耗的重要途径[3]。目前对飞机用高强钢零件的修复研究较少,而且现有的修复方法均有一定的局限性,因此亟待进一步深入研发修复高强钢零部件的方法[4]。高强钢零件通常采用表面改性技术进行修复,修复后零件的力学性能和表面质量是评定修复方法是否适用的标准之一[5]。30CrMnSiA 钢具有良好的加工性能和抗疲劳性能[6],且应用广泛。修复 30CrMnSiA 钢零件的技术主要有喷涂、氩弧焊和激光熔覆等[7-8]。以往主要是研究修复件的组织和力学性能,对采用焊接工艺修复的研究较少。

本文对预制缺陷的30CrMnSiA 钢疲劳试样进行了激光堆焊修复,采用正交试验获得最佳激光堆焊修复工艺,检测了用不同焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能及其断口特征。

1 试验内容

1.1 试验材料

试验用 30CrMnSiA 钢的化学成分如表 1 所示。焊丝材料为 GH3030 合金、H18CrMoA 和 30CrMnSiA 钢,GH3030 合金和 H18CrMoA 钢焊丝的化学成分如表 2 和表 3 所示。

表 1 试验用 30CrMnSiA 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the tested 30CrMnSiA steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
质量分数/%	0.30	1.11	0.9	0.023	0.025	1.0	0.030	0.024

表 2 GH3030 合金焊丝的化学成分

Table 2 Chemical composition of the GH3030 alloy welding wire

元素	C	Cr	Ti	Al	Fe	Mn	Si	P	S
质量分数/%	0.11	20.5	0.25	0.15	1.5	0.6	0.8	0.020	0.020

表 3 H18CrMoA 钢焊丝的化学成分

Table 3 Chemical composition of the H18CrMoA steel welding wire

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
质量分数/%	0.16	0.24	0.38	0.78	0.32	0.10	0.025	0.025

1.2 试样制备

按 GB/T 4337—2008《金属旋转弯曲疲劳试验方法》制备的预制缺陷的疲劳试样尺寸如图 1(a)所示,试样中心两边开深 0.6 mm、宽 3 mm 的 U 形槽。按 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验》制备的预制缺陷的拉伸试样尺寸如图 1(b)所示,在试样中心采用线切割方法预制尺寸为 3 mm ×25 mm ×1.2 mm 的缺陷。

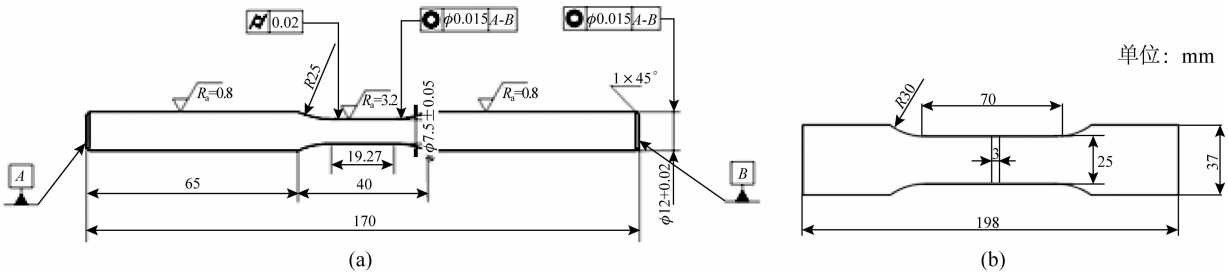


图 1 预制缺陷的疲劳试样(a)和拉伸试样(b)尺寸

Fig. 1 Dimensions of the fatigue specimen(a) and tensile specimen(b) with prefabricated defect

1.3 试验方法

激光堆焊设备由作为核心的 ipg 激光器和 KUKA 六自由度机械手及福尼斯送丝机构组成,如图 2 所示。正交试验的指标选用拉伸试样的抗拉强度,疲劳试验循环次数不能作为正交试验指标。首先采用预制缺陷深度为 1.2 mm 的拉伸试样进行拉伸试验。激光堆焊用焊丝材料为 GH3030 合金。根据以往经验,试验时设定离焦量为 26 mm,氩气流量为 3.1 L/min,温度为 25 ℃,湿度为 32%。试验获得的激光功率为 3.2 ~ 3.4 kW,扫描速度为 1.2 ~ 1.4 m/min,送丝速度为 2.6 ~ 3.0 m/min。确定最佳参数后采用不同

焊丝对预制缺陷的疲劳试样进行激光堆焊修复,比较修复后试样的疲劳性能,确定能进行激光修复的焊丝,并对采用该焊丝修复的疲劳试样的断口进行分析。



图 2　激光堆焊设备

Fig. 2　Laser surfacing equipment

2　试验结果

2.1　正交试验结果与分析

对 30CrMnSiA 钢激光堆焊工艺进行三因素三水平的正交试验,因素为激光功率、扫描速度和送丝速度,以抗拉强度为试验指标,不考虑各因素之间的作用,试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,9 组试验的抗拉强度为 700 ~ 1 000 MPa,差异较大。第 7 组试验($A_3B_1C_2$)的抗拉强度最高,为 1 000 MPa。但 $A_3B_1C_2$ 方案不一定是激光功率 A、扫描速度 B 和送丝速度 C 的最佳组合。为确定最佳激光堆焊工艺参数,还需进行极差分析和计算。每个因素的 K_i、$\bar{K}_i$、R 计算结果如表 5 所示,其中 K_i 表示每个因素(任意列)的相应试验结果之和,水平号为 $i(i=1,2,3)$;$\bar{K}_i$ 表示当任一列的因素取 i 水平时试验结果的算术平均值,即 $\bar{K}_i = K/3$;R 表示极差,在任意列上 $R = \max\{\bar{K}_1,\bar{K}_2,\bar{K}_3\} - \min\{\bar{K}_1,\bar{K}_2,\bar{K}_3\}$,极差越大说明该因素对试验结果的影响越大。图 3 为以该因素的水平为横坐标、以各指标的平均值为纵坐标绘制的该因素和指标的趋势图。

表 4　30CrMnSiA 钢的正交试验结果

Table 4　Orthogonal test results of the 30CrMnSiA steel

编号	因素			指标
	激光功率 A/kW	扫描速度 B/(m·min^{-1})	送丝速度 C/(m·min^{-1})	抗拉强度/MPa
1	1(3.2)	1(1.2)	1(2.6)	895
2	1	2	2	794
3	1	3	3	817
4	2(3.3)	1	3(3.0)	986
5	2	2(1.3)	1	842
6	2	3	2	933
7	3(3.4)	1	2(2.8)	1 000
8	3	2	3	967
9	3	3(1.4)	1	871

表 5　30CrMnSiA 钢的正交试验极差分析

Table 5　Orthogonal test range analysis of the 30CrMnSiA steel

指标	K	因素		
		激光功率 A/kW	扫描速度 B/(m·min^{-1})	送丝速度 C/(m·min^{-1})
抗拉强度	K_1	2 506	2 881	2 608
	K_2	2 761	2 603	2 727
	K_3	2 838	2 621	2 770
	$\bar{K}_1$ ($K_1/3$)	835	960	869
	$\bar{K}_2$ ($K_2/3$)	920	868	909
	$\bar{K}_3$ ($K_3/3$)	946	874	923
	R	111	92	54

从表 5 和图 3 可以看出,对于抗拉强度,3 个因素(激光功率、扫描速度和送丝速度)的极差分别为 111、92、54,说明这些因素的影响程度为 A >

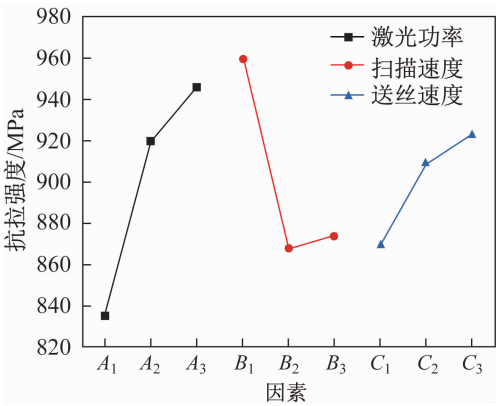


图 3　30CrMnSiA 钢的因素与抗拉强度之间的关系

Fig. 3　Relation of factors to tensile strength for the 30CrMnSiA steel

$B>C$。正交试验的极差分析表明：因素 A（激光功率）对修复后拉伸试样的抗拉强度影响最大，并且随着因素 A 的增大，修复后拉伸试样的抗拉强度也提高；因素 B（扫描速度）对修复后拉伸试样的抗拉强度也有一定影响，随着因素 B 的增大，抗拉强度先下降后升高；随着因素 C（送丝速度）的增大，修复后拉伸试样的抗拉强度升高。因此，对于试验的指标（抗拉强度），各因素的最佳水平组合为 $A_3B_1C_3$，但该组合并不在正交试验中，需进一步试验验证。试验确定的最佳激光堆焊工艺参数为激光功率 3.4 kW、扫描速度 1.2 m/min、送丝速度 3.0 m/min。

2.2 修复后疲劳试样的性能

表 6 为 30CrMnSiA 钢旋转弯曲疲劳试验的应力水平和旋转周期。表 7、表 8 和表 9 分别为采用 H18CrMoA 钢焊丝、30CrMnSiA 钢焊丝和 GH3030 合金焊丝激光堆焊的疲劳试样的旋转弯曲疲劳试验结果。图 4 为 30CrMnSiA 钢和采用不同焊丝修复的疲劳试样的 S-N 曲线，可以更直观地看出以 660、550 和 440 MPa 的应力水平疲劳试验时试样疲劳性能的差异。以 660 和 550 MPa 的应力水平疲劳试验时，用 GH3030 合金焊丝和 30CrMnSiA 钢焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能接近但显著低于基体。以 3 种应力水平试验时，用 H18CrMoA 钢焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能均优于用其他两种焊丝修复的疲劳试样。以 440 MPa 的应力水平疲劳试验时，采用 GH3030 焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能与基体的相近，但采用另两种焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能比基体的差。总之，采用 GH3030 合金焊丝修复的疲劳试样的疲劳性能优于采用其他两种焊丝修复的疲劳试样。

表 6 30CrMnSiA 钢旋转弯曲疲劳试验的应力水平和旋转周期

Table 6 Stress level and rotating cycle of rotating bending fatigue test for the 30CrMnSiA steel

应力水平/MPa	试验力/N	砝码加重/kg	循环次数	平均循环次数
S=660	137	30	81 588,45 220,70 274	65 694
S=550	114	25	312 131,386 545,324 136	340 937
S=440	92	20	$>10^6$, $>10^6$, $>10^6$	$>10^6$

表 7 采用 H18CrMoA 钢焊丝激光堆焊的疲劳试样的旋转弯曲疲劳试验结果

Table 7 Rotating bending fatigue test results of the fatigue specimen laser surfaced by H18CrMoA steel welding wire

应力水平/MPa	试验力/N	循环次数	平均循环次数
S=660	137	5 003,3 760,4 128	4 297
S=550	114	7 161,8 350,8 106	7 872
S=440	92	19 323,23 643,21 751	21 572

表 8 采用 30CrMnSiA 钢焊丝激光堆焊的疲劳试样的旋转弯曲疲劳试验结果

Table 8 Rotating bending fatigue test results of the fatigue specimen laser surfaced by 30CrMnSiA steel welding wire

应力水平/MPa	试验力/N	循环次数	平均循环次数
S=660	137	14 777,20 043,9 724	14 848
S=550	114	21 954,38 226,28 500	29 560
S=440	92	56 204,66 546,35 678	52 809

表 9 采用 GH3030 合金焊丝激光堆焊的疲劳试样的旋转弯曲疲劳试验结果

Table 9 Rotating bending fatigue test results of the fatigue specimen laser surfaced by GH3030 alloy welding wire

应力水平/MPa	试验力/N	循环次数	平均循环次数
S=660	137	13 409,14 962,14 414	14 261
S=550	114	20 484,46 441,36 011	34 312
S=440	92	$>10^6$, $>10^6$, $>10^6$	$>10^6$

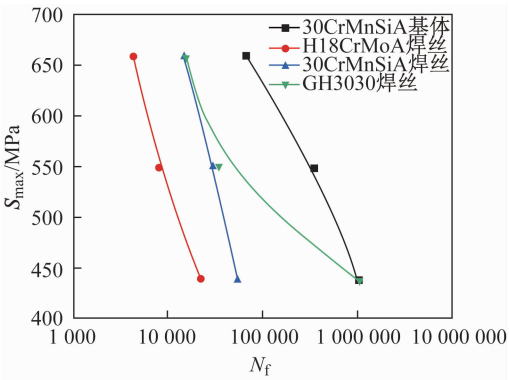


图 4 30CrMnSiA 钢和用不同焊丝修复的疲劳试样的 S-N 曲线

Fig. 4 S-N curves of the 30CrMnSiA steel and the fatigue specimens repaired by different welding wires

2.3　断口分析

对采用 GH3030 合金焊丝激光堆焊修复的疲劳试样进行了断口分析。图 5 为以 550 MPa 应力水平旋转弯曲疲劳试验后采用 GH3030 合金焊丝激光堆焊修复的疲劳试样断口的宏观形貌,可以发现断口从边缘向心部依次为修复区、热影响区和基体。修复的疲劳试样断口也有 3 个区域,其中 A 为疲劳源区,B 为疲劳裂纹扩展区,C 为疲劳瞬断区。与基体相似,瞬断区与疲劳源区之间有一定的旋转角度,不是正对着疲劳源区。宏观断口表明疲劳裂纹从修复区表面萌生,疲劳源区和疲劳裂纹扩展区均有放射状棱线,显示了疲劳裂纹的扩展方向。

疲劳源区表面较光滑明亮,这由断裂初期裂纹多次在拉应力和压应力作用下产生机械磨擦所致。图 5(b)为疲劳源区的扫描电子显微图,在应力作用下裂纹从修复区表面萌生,穿过堆焊层柱状晶,具有穿晶断裂特征,如图中箭头所示。B 处有明显的贝壳纹,是裂纹稳定扩展区,表面较平坦,灰色,隐约可见放射状棱线,两侧比中间明显,显示了裂纹的扩展方向。图 5(c)为疲劳裂纹扩展区的扫描电子显微图,有明显的裂纹扩展特征。C 处为瞬断区,试样最终断裂于修复区,约占断面的 10%,表面粗糙,暗灰色。图 5(d)为瞬断区的扫描电子显微图,裂纹扩展至临界长度时,试样快速断裂,断口特征与该材料的拉伸断口相似,有破碎的第二相颗粒和大量尺寸、形状不同的孔洞和韧窝及撕裂棱,具有韧性断裂特征。

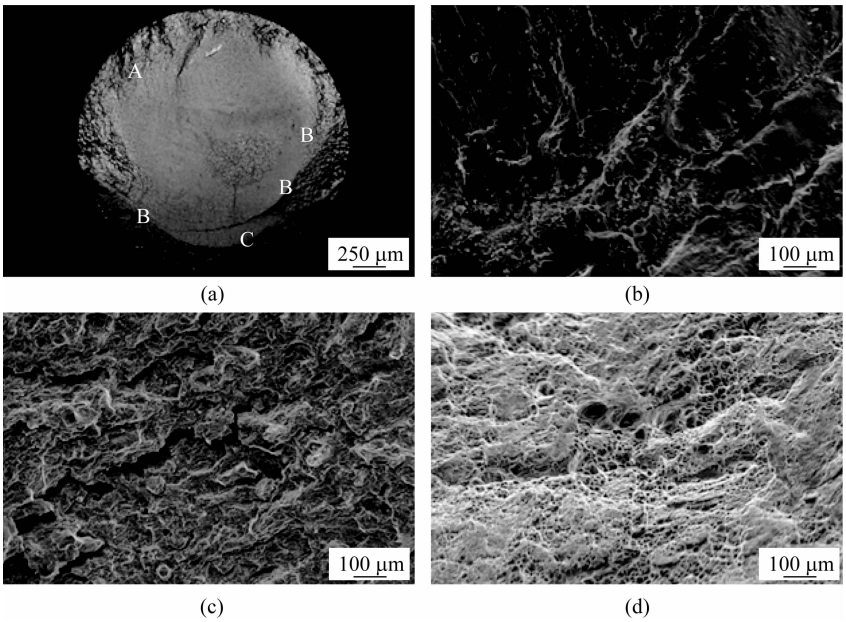


图 5　以 550 MPa 应力水平旋转弯曲疲劳试验后采用 GH3030 焊丝激光堆焊修复的疲劳试样断口的宏观形貌(a)及其疲劳源区(b)、裂纹扩展区(c)和瞬断区(d)的微观形貌

Fig. 5　Macrograph of fracture(a) of the fatigue specimen repaired by laser surfacing with GH3030 welding wire and micrographs of fatigue source zone(b), crack propagation zone(c) and transient fracturing zone(d) in the fracture after rotating bending fatigue test at a stress level of 550 MPa

比较以不同应力水平旋转弯曲疲劳试验后试样断口的形貌可以发现,对于采用 GH3030 合金焊丝激光堆焊修复的疲劳试样,与以 660 MPa 应力水平疲劳试验后的断口相比,以 550 MPa 应力水平试验后的断口不够平整。如图 6(a)所示,裂纹从修复区表面萌生,扩展至热影响区,最终达到基体,在心部断裂。疲劳裂纹源区的扫描电子显微图如图 6(b)所示,表面均有明显的裂纹源,如图中圆圈所示。裂纹基本沿 45°角扩展,穿过堆焊层柱状晶。裂纹扩展区微观形貌如图 6(c)所示,有明显的贝壳纹及较多的二次裂纹,热影响区的裂纹扩展是导致试样最终断裂的主要原因。瞬断区有大量尺寸和形状不同的孔洞和韧窝及撕裂棱,具有韧性断裂特征。

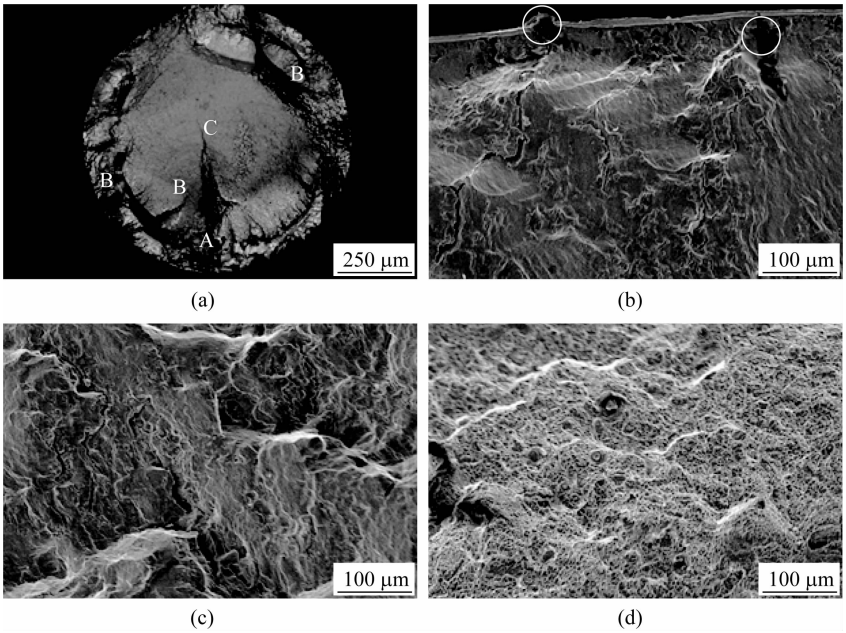


图6 以660 MPa应力水平旋转弯曲疲劳试验后采用GH3030焊丝激光堆焊修复的疲劳试样断口的宏观形貌(a)及其疲劳源区(b)、裂纹扩展区(c)和瞬断区(d)的微观形貌

Fig. 6 Macrograph of fracture(a) of the fatigue specimen repaired by laser surfacing with GH3030 welding wire and micrographs of fatigue source zone(b), crack propagation zone(c) and transient fracturing zone(d) in the fracture after rotating bending fatigue test at a stress level of 660 MPa

3 结论

(1)采用正交试验获得的最佳激光堆焊工艺参数为激光功率3.4 kW、扫描速度1.2 m/min、送丝速度3.0 m/min;对激光堆焊修复后30CrMnSiA钢拉伸试样的抗拉强度的影响程度从大到小依次为激光功率、扫描速度、送丝速度。

(2)采用GH3030合金焊丝激光堆焊修复的30CrMnSiA钢疲劳试样的疲劳性能最佳;以440 MPa的应力水平疲劳试验时,激光堆焊修复的30CrMnSiA钢的弯曲疲劳试验循环次数大于10^6,与采用GH3030合金焊丝修复的疲劳试样和30CrMnSiA钢疲劳试样的相当,均未断裂;但以660 MPa的应力水平疲劳试验时,采用GH3030合金焊丝激光堆焊修复的疲劳试样的疲劳性能较差,这是由于以高应力水平疲劳试验易产生更多的裂纹源,导致疲劳性能下降。

参考文献

[1] FISHER J W, ROY S. Fatigue of steel bridge infrastructure[J]. Structureand Infrastructure Engineering, 2011, 7(7/8): 457-475.

[2] LAZIC V, ARSIC D, NIKOLIC R R, et al. Application of the high strength steel HARDOX 450 for manufacturing of assemblies in the military industry [J]. Key Engineering Materials, 2017, 755: 96-105.

[3] RUMINSKI A. Failure Analysis of a low-temperature carbon steel pipe from a nuclear power station cooling water system [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(4): 534-540.

[4] ZHENG Z G, YUAN S, SUN T, et al. Fractographic study of fatigue cracks in a steel car wheel [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 47: 199-207.

[5] WANG L. Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasmanitriding[J]. Applied Surface Science, 2003, 211(1/2/3/4): 308-314.

[6] 邹文栋,黄长辉,郑玱,等. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1612-1619.

[7] 黎文强. 30CrMnSi钢表面激光熔覆强化技术研究[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(10):1058-1061.

[8] 王浩军,张兵宪,马玲军,等. 补焊次数对30CrMnSiA钢接头组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料,2023,48(6):72-78.

修回日期:2023-07-31