

激光与光电子学进展

BS960E 高强钢激光-电弧复合焊接头氢脆行为研究

吴颖¹, 曾强^{1*}, 肖辉进¹, 朱绍维²¹四川文理学院智能制造学院, 四川 达州 635000;²成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092

摘要 氢脆具有很强的微观组织敏感性, 威胁着各类高强结构材料的安全服役。采用激光-电弧复合焊工艺对 BS960E 型高强钢进行焊接, 对接头在原位电化学充氢的条件下进行慢应变速率(10^{-5} s^{-1})拉伸试验, 结合微观组织和断裂特征进行分析对接头的氢脆行为进行研究。结果表明, 焊接热循环所形成的富马氏体中的细晶区可以使接头表现出一定的氢脆敏感性, 马氏体较大的氢扩散系数和较低的氢溶解度以及氢在晶界上的快速扩散是引起接头对氢脆敏感的主要原因, 通过控制焊接工艺参数可抑制焊接热循环所引起的马氏体转变量, 能够降低 BS960E 型高强钢激光-电弧复合焊接头的氢脆敏感性。

关键词 激光光学; 激光-电弧复合焊; BS960E 型高强钢; 氢脆; 马氏体

中图分类号 TG142.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114014

Hydrogen Embrittlement Behavior of BS960E High Strength Steel Laser-Arc Hybrid Welded Joint

Wu Ying¹, Zeng Qiang^{1*}, Xiao Huijin¹, Zhu Shaowei²¹*School of Intelligent Manufacturing, Sichuan University of Arts and Science, Dazhou, Sichuan 635000, China;*²*Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610092, China*

Abstract Hydrogen embrittlement has strong microstructural sensitivity, which threatens the safe service of all kinds of high strength structural materials. BS960E high strength steel is welded by laser-arc composite welding process, and the joints are subjected to slow strain rate (10^{-5} s^{-1}) tensile test under the condition of *in-situ* electrochemical hydrogen charging. The microstructure and fracture characteristics of the joints are analyzed, and the hydrogen embrittlement behavior of the joints is studied. Results show that the welding thermal cycle of rich martensite formed by fine grain area can make joint show some hydrogen embrittlement sensitivity, martensite higher hydrogen diffusion coefficient and lower hydrogen solubility and rapid diffusion of hydrogen on the grain boundary is the main cause of joint is sensitive to hydrogen embrittlement, by controlling the welding process parameters can inhibit the welding thermal cycle caused by the martensitic transformation, it can reduce the hydrogen embrittlement sensitivity of BS960E high strength steel laser-arc composite welding joint.

Key words laser optics; laser-arc hybrid welding; BS960E high strength steel; hydrogen embrittlement; martensite

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-07-18

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04014-031)

通信作者: *luofang1022@163.com

1 引言

汽车承载结构的轻量化设计是实现节能减排、缓解资源紧张和减少环境污染的一个有效途径,为此必须应用高强度和超高强度的汽车承载结构用钢^[1]。焊接是实现快速且经济制造汽车复杂承载结构的成熟方法之一,其中激光-电弧复合焊具有焊接速度快、热源集中、热输入量小和焊缝成形好等特点^[2-3],目前已广泛应用于汽车承载结构的制造。

氢脆是指氢原子进入材料内部后引起材料力学性能的退化^[4],并且随着抗拉强度的提高,材料的氢脆敏感性会随之增大^[5]。氢脆具有很强的微观组织依赖性,在低合金钢中马氏体组织具有最好的抗氢脆能力,马氏体组织因其具有较高的硬度和位错密度而对氢脆最为敏感^[6],粒状和板条状贝氏体组织也被报道具有一定的氢脆敏感性^[7]。低合金钢通常具有良好的淬透性,在焊接热循环的过程中,热影响区中的温度超过 A_{c3} (A_{c3} 为亚共析钢在加热的过程中,铁素体均匀转变为奥氏体的温度)后将不可避免地形成淬硬马氏体组织^[8-9]。采用控轧控冷技术制备的BS960E型低合金钢是一种具有屈服强度为1000 MPa的低合金调质钢,其具有良好的综合力学性能。对于BS960E型低合金钢激光-电弧复合焊接头的热影响区中微观组织的研究发现,极快的冷却速

度会导致热影响区内的马氏体发生转变^[10-11]。汽车承载结构在服役过程中,环境中的氢(主要来自水或水蒸气)经过阴极反应后可以扩散进入材料中,使得由BS960E型低合金钢焊接制造的承载结构存在氢脆的风险。

本文针对新型的汽车承载结构所用的BS960E型低合金钢激光-电弧复合焊接头,在扫描电镜中通过二次电子成像对接头各区域的微观组织进行分析,并在原位电化学充氢的条件下进行慢应变速率拉伸试验,结合断裂路径和断口形貌的分析对接头的氢脆行为进行研究。

2 材料及试验

试验母材为控轧控冷技术所制备的BS960E型贝氏体低合金钢,填充材料是直径为1.2 mm且屈服强度为800 MPa的ER80YM型低合金低合金钢焊丝,母材及焊丝的主要化学成分(质量分数)如表1所示。将母材加工成300 mm×150 mm×6 mm大小的“I”形坡口焊接试板,采用激光-电弧复合焊工艺对其进行焊接。激光-电弧复合焊系统由功率为10 kW的TruDisk 10002型激光器、福尼斯焊机和ABB机器人组成。采用激光在前、电弧在后的方式,在体积分数为80%的Ar和体积分数为20%的CO₂的混合气体保护下进行焊接,焊接速度为22 mm/s,送丝速度为12 m/min,激光功率为4.5 kW。

表1 母材及焊丝的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of base metal and welding wire

unit: %

Material	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu+V+Al+Ti
BS960E	0.170	0.090	1.240	0.002	0.012	0.230	0.030	0.520	0.120
ER80YM	0.061	0.390	1.450	0.003	0.009	0.320	2.810	0.370	0.110

试板焊接完成后,对焊缝进行X射线探伤以挑选出探伤合格的试板。沿着垂直于焊缝的方向切取金相试样,采用金相制备标准程序对试样进行打磨抛光,然后在扫描电镜下对接头各区域的微观组织进行分析。根据GB/T 2654-2008标准,采用HD-VS30型显微硬度计对接头截面上沿焊缝垂直方向的硬度分布进行测定,测点间距为0.2 mm,试验载荷为1 g,载荷保持时间为10 s。以焊缝为中心,沿着垂直于焊缝的方向切取尺寸为30 mm×4 mm×2 mm的拉伸试样,在原位电化学充氢的条件下进行慢应变速率拉伸试验,充氢溶液是物质的量浓度为0.1 mol/L的NaOH和浓度为2 g/L的CH₄N₂S的混合溶液。充氢过程中,将拉伸试样作

为阴极,将铂片作为阳极,如图1所示。充氢过程中

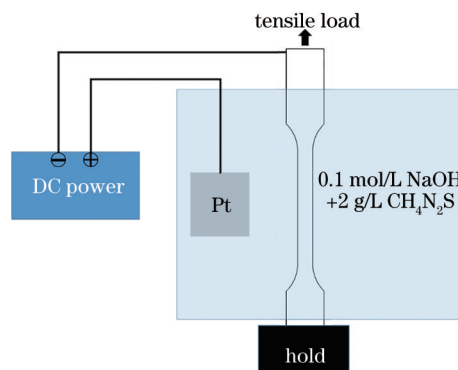


图1 原位电化学充氢拉伸试验示意图

Fig. 1 Schematic of *in-situ* electrochemical hydrogen charging tensile test

的电流密度分别为 1, 5, 10 mA/cm², 拉伸应变速度设定为 10⁻⁵ s⁻¹, 在该条件下得到的结果与空气环境中的拉伸试验结果进行对比分析。为了确保数据的可靠性, 每种条件均采用三个平行试样。拉伸试验结束后, 在扫描电镜下对断口表面形貌进行分析。

3 结果与分析

3.1 微观组织

图 2 为焊接接头横截面上各区域的显微组织形貌, 其中 M-A 为马氏体+残余奥氏体, B 为贝氏体, GB 为晶界, F 为铁素体。从图 2(a) 的宏观形貌可以看到, 在本文所使用的焊接工艺的条件下, 接头的焊接质量良好, 未观察到未熔合、咬边和裂纹等焊接缺陷。焊缝区由贝氏体和少量的富碳马氏体+残余奥氏体构成, 如图 2(b) 所示。靠近熔合线的区域由于焊接热循环的温度可达 1300 °C 以上, 这会造

成原奥氏体晶粒的长大并形成粗晶区, 如图 2(c) 所示。根据激光-电弧复合热源集中的特点, 由于淬火效应而在粗晶区内形成板条马氏体组织。随着焊接热循环峰值温度的降低, 原奥氏体晶粒的长大受到抑制, 从而形成细晶区, 如图 2(d) 所示。但细晶区内的热循环峰值温度仍然高于 A_{C3}, 因此细晶区内由于淬火效应而形成细小的板条马氏体组织。随着焊接热循环峰值温度的进一步降低, 在 A_{C1}~A_{C3} (A_{C1} 为钢加热过程中, 奥氏体开始形成的温度) 的温度区间会形成不完全相变区, 如图 2(e) 所示。不完全相变区被加热至奥氏体化温度后, 大量的碳会溶解进入奥氏体中, 这增加了其稳定性。在随后的冷却过程中这些高碳含量奥氏体中的一部分会转变为铁素体和马氏体, 另一部分则形成富碳的 M-A 组元。母材区域由粒状贝氏体和短轴状铁素体组成, 如图 2(f) 所示。

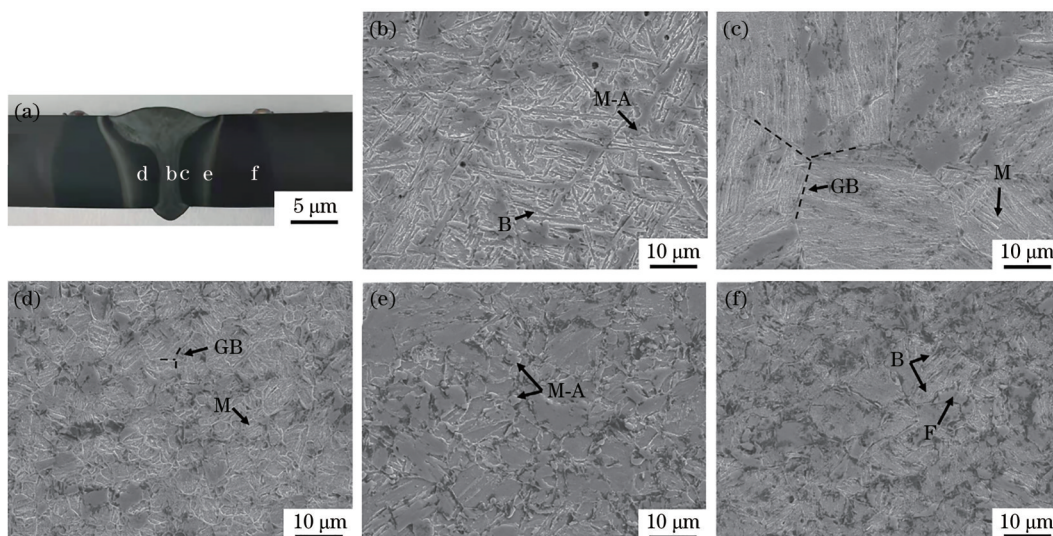


图 2 焊接接头的显微组织。(a)宏观形貌;(b)焊缝区域;(c)粗晶区;(d)细晶区;(e)不完全相变区;(f)母材
Fig. 2 Microstructure of welded joint. (a) Macroscopic topography; (b) weld zone; (c) coarse-grained region; (d) fine grain zone; (e) incomplete phase transition region; (f) base metal

3.2 焊接接头的显微硬度分布

图 3 为焊接接头横截面上沿焊缝垂直方向的硬度分布, 相邻测点间的距离为 0.2 mm。从图 3 可以看出, 焊缝区域的硬度约为 340 HV, 略低于母材 (硬度约为 350 HV)。紧邻熔合线的粗晶区和细晶区的硬度最高, 即硬化区 (HZ), 显微硬度达到 420 HV, 主要原因是该区域在焊接热循环的过程中发生了大量的马氏体相变。不完全相变区的硬度最低, 约为 320 HV, 即软化区 (SZ)。

3.3 拉伸试验

原位充氢及空气环境中的拉伸试验结果如图 4

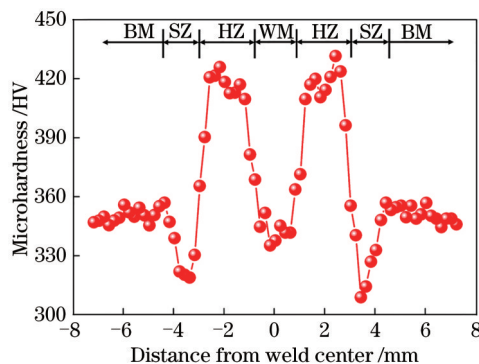


图 3 焊接接头的硬度分布曲线
Fig. 3 Hardness distribution curve of welded joint

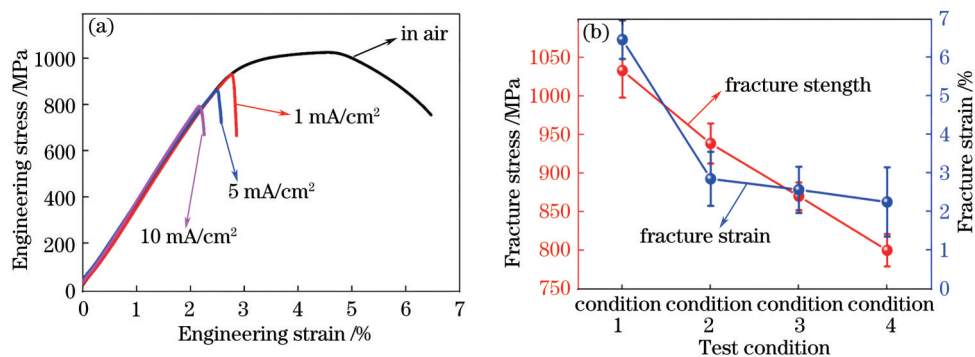


图 4 拉伸试验结果。(a)拉伸工程应力-工程应变曲线;(b)不同条件下的断裂强度和断裂应变曲线

Fig. 4 Tensile test results. (a) Tensile engineering stress-strain curves; (b) fracture stress-strain curves under different conditions

所示,其中条件1表示在空气环境中进行测试,条件2~4表示电流密度分别为1,5,10 mA/cm²的条件下进行测试。从图4可以看出,空气环境中接头的抗拉强度达到1080 MPa,断后延伸率为6.7%,其中均匀塑性变形率约为2%。在原位充氢的条件下,所有试样均未达到室温下的屈服强度就发生断裂,并且拉伸曲线呈现出典型的脆性断裂特征,如图4(a)所示。此外,随着充氢电流密度的增大,接头的断裂强度和断后延伸率均随之降低,如图4(b)所示,说明氢对接头的拉伸性能起到显著的恶化作用。

图5给出了各试样侧表面的断裂位置。从图5(a)~5(c)可以看出,空气环境中拉伸试样的断裂位置位于母材区,与文献报道的试验结果一致^[1,8-9]。在原位充氢的条件下,裂纹从左侧萌生并向右侧扩展,如图5(c)所示。左侧裂纹平直且有大量的二次裂纹,说明断裂为脆性断裂;右侧裂纹附近存在明显的塑性变形痕迹,说明断裂为韧性断裂。二次裂纹放大后的形貌如图5(e)所示,可以看出裂纹处于细晶区内,且沿马氏体/基体界面呈穿晶扩展,右侧的塑性断裂区则紧邻细晶区中的不完全相变区扩展。

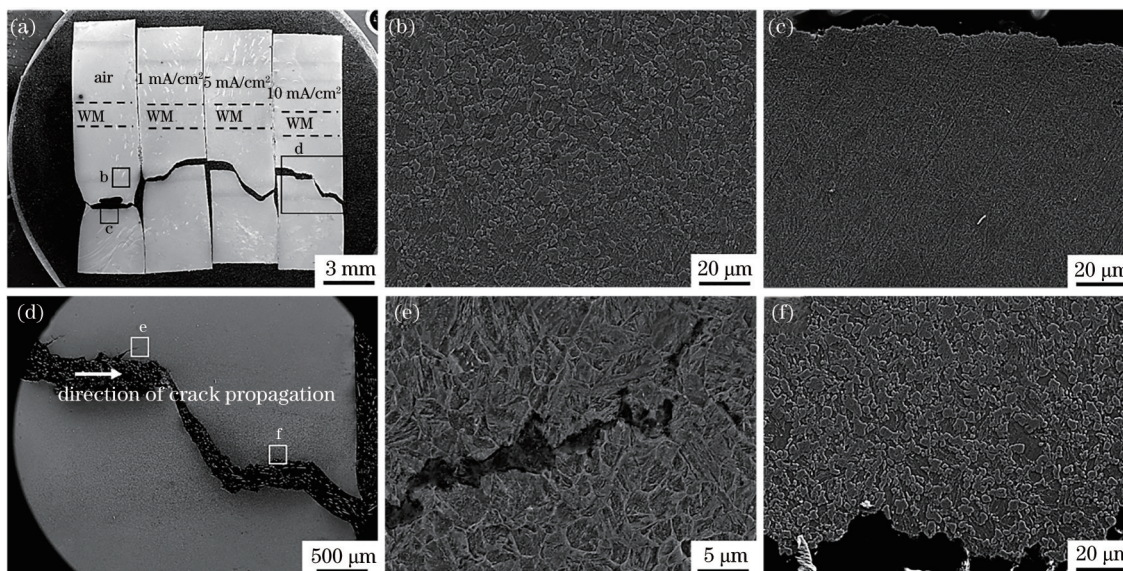


图 5 断裂位置。(a)宏观形貌;(b)空气中断裂试样不完全相变区;(c)空气中断裂试样母材区;(d)10 mA/cm²电流密度下的充氢试样断裂位置;(e)氢脆裂纹扩展路径;(f)塑性断裂区形貌

Fig. 5 Fracture location. (a) Macroscopic topography; (b) incomplete phase transition zone of fractured sample in air; (c) base material area of fractured sample in air; (d) fracture position of hydrogen-filled sample at current density of 10 mA/cm²; (e) hydrogen embrittlement crack propagation path; (f) morphology of plastic fracture zone

3.4 断口形貌

扫描电镜下的断口表面形貌如图6所示。空气

环境中,在断口的宏观形貌上可以观察到明显的颈缩和剪切唇,如图6(a)所示,微观上则是微孔缩聚

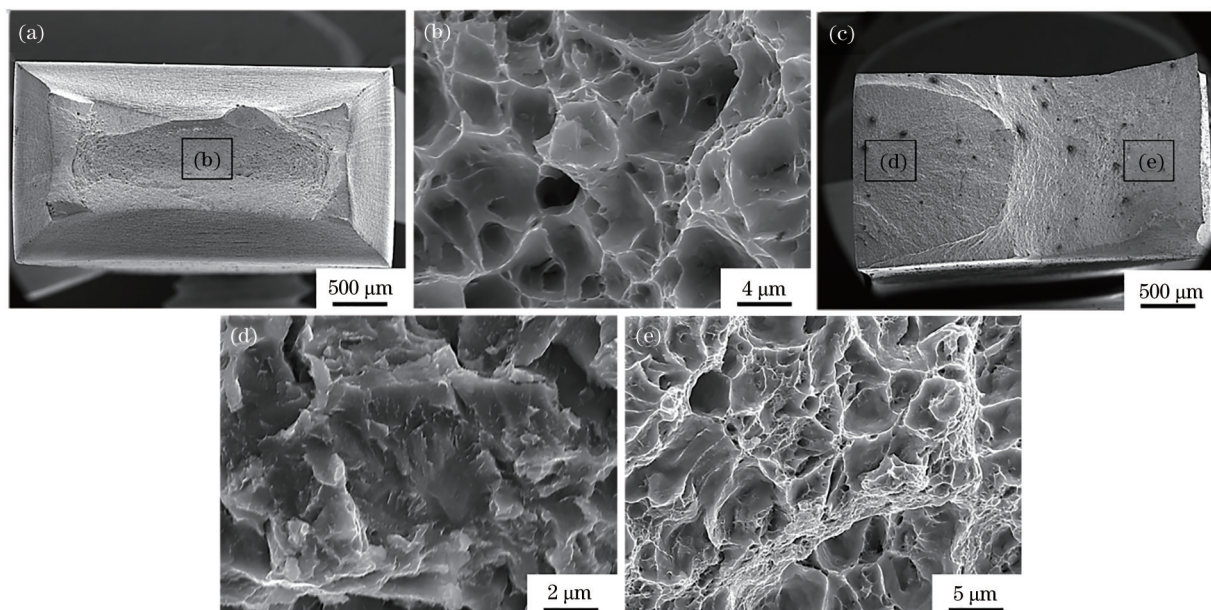


图6 断口表面的SEM形貌。(a)空气中断口宏观形貌;(b)空气中断口微观形貌;(c)原位充氢断口宏观形貌;(d)原位充氢脆断区形貌;(e)原位充氢断口韧性区形貌

Fig. 6 SEM morphology of fracture surface. (a) Macroscopic appearance of fracture in air; (b) microstructure of fracture in air; (c) macroscopic morphology of *in-situ* hydrogen filling fracture; (d) morphology of brittle fracture zone of *in-situ* hydrogen-filled fracture; (e) morphology of *in-situ* hydrogen filled fracture toughness zone

而形成的韧窝特征,如图6(b)所示,说明接头在空气环境中具有良好的塑性变形能力。原位充氢的条件下,试样拉伸断裂的断口表面宏观形貌如图6(c)所示,其左侧为平坦的脆性断裂区域,右侧为具有剪切唇的韧性断裂区域,分别对应图5的细晶区裂纹和不完全相变区裂纹。从图6(c)还可以看出,裂纹从左侧萌生并向内部扩展,最后由于裂纹尖端应力集中而发生快速断裂。微观形貌上,脆性断裂区域沿马氏体/基体界面开裂,从而形成穿晶解理特征,如图6(d)所示,解理台阶和河流花样清晰可见;韧性断裂区域则为微孔缩聚所形成的韧窝特征,如图6(e)所示。

3.5 分析讨论

激光-电弧复合焊具有焊接效率高和成型质量好等优点,广泛应用于各类承载结构的制造。但由于激光-电弧复合焊具有热源集中和较高的焊接速度的优点,造成高强钢焊接接头靠近焊缝侧的热影响区后形成淬火效应,在该区域内形成马氏体组织而造成局部硬化,因此该区域具有较高的硬度,但冲击性能较差^[8-9]。远离焊缝的热影响区后由于热循环温度较低,使该区域完全奥氏体化,则该区域的微观组织仅发生部分转变,并且碳被溶入奥氏体中而造成该区域的软化,因此空气环境中拉伸试样的断裂

位置在软化区内。

马氏体对氢脆具有极高的敏感性,主要原因在于氢在马氏体中具有较大的扩散系数和较低的溶解度^[12]。在原位电化学充氢拉伸的过程中,氢将沿着马氏体向材料内部快速扩展,从而使得硬化区内具有较高的氢浓度。同时,晶界是氢的另一个快速扩散通道^[13],而细晶区内含有大量的晶界,所以氢可以在其中快速扩散,因此原位充氢拉伸过程将会造成细晶区内氢浓度的进一步增加,并导致原位充氢的条件下拉伸试样的氢脆裂纹萌生于硬化区内的细晶区。

4 结 论

本文采用“原位电化学充氢-拉伸”试验对BS960E型高强钢激光-电弧复合焊接头的氢脆断裂行为进行研究,结合微观组织和断裂特征进行分析。结果表明,焊接热循环所引起的淬火效应可以使热影响区内的粗晶区和细晶区形成板条马氏体组织;由于马氏体具有较高的氢脆敏感性,氢脆裂纹于细晶区萌生,并沿马氏体/基体界面快速扩展而发生脆性断裂;建议通过优化焊接参数来控制焊接热循环所引起的马氏体相变数量,从而降低接头的氢脆敏感性。

参 考 文 献

- [1] Huan P C, Wang X N, Zhu T C, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 800 MPa grade hot-rolled high strength steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102002. 环鹏程, 王晓南, 朱天才, 等. 800 MPa 级热轧高强度钢激光焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102002.
- [2] Wang X N, Zheng Z, Zeng P L, et al. Effect of microstructure on hardness and fatigue properties of 800 MPa high strength steel fiber laser weld joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202010. 王晓南, 郑知, 曾盼林, 等. 800 MPa 级高强度钢光纤激光焊接接头微观结构对硬度及疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202010.
- [3] Fu Z H, Gou G Q, Zhu Z Y, et al. Stress corrosion cracking behavior of SUS301L-MT stainless steel laser-arc hybrid welded joints[J]. Corrosion Science, 2018, 143: 23-30.
- [4] Fu Z H, Li T, Shan M L, et al. Hydrogen atoms on the SCC behavior of SUS301L-MT stainless steel laser-arc hybrid welded joints[J]. Corrosion Science, 2019, 148: 272-280.
- [5] Li J X, Wang W, Zhou Y, et al. A review of research status of hydrogen embrittlement for automotive advanced high-strength steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 444-458. 李金许, 王伟, 周耀, 等. 汽车用先进高强度钢的氢脆研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 444-458.
- [6] Fu Z H, Yang B J, Shan M L, et al. Hydrogen embrittlement behavior of SUS301L-MT stainless steel laser-arc hybrid welded joint localized zones[J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108337.
- [7] Ma H C, Liu Z Y, Du C W, et al. Effect of cathodic potentials on the SCC behavior of E690 steel in simulated seawater[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 22-31.
- [8] Lu S W, Dong C F, Gong Y L, et al. Determination of simulated SHCCT curves and welding procedure qualification of 960 MPa grade high strength steel[J]. Welding & Joining, 2019(7): 50-56, 68. 卢尚文, 董常福, 龚艳丽, 等. 960 MPa 级高强度钢焊接热影响区连续冷却曲线的测定及焊接工艺评定[J]. 焊接, 2019(7): 50-56, 68.
- [9] Wang J F, Wang L J, Yang L J, et al. Research on microstructure and properties of laser welding DP1000 high-strength steel weld joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903003. 王金凤, 王立君, 杨立军, 等. DP1000 高强度钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903003.
- [10] Ma Y L, Chen H, Zhao X, et al. Mechanical properties of laser hybrid welded joint of 1000 MPa ultrahigh-strength steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602113. 马彦龙, 陈辉, 赵旭, 等. 1000 MPa 级超高强度钢激光复合焊接接头力学性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602113.
- [11] Li B, Zhu Y H, Deng L, et al. Research on the microstructure and properties of high-speed laser-arc hybrid welding of BS960E high strength alloy steel[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(5): 72-76, 136-137. 李斌, 朱勇辉, 邓林, 等. BS960E 高强度钢激光-电弧复合高速焊接接头组织及性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 72-76, 136-137.
- [12] Zhang X F, Wan Y X, Wu X J, et al. Research progress toward hydrogen embrittlement microstructure mechanism in Fe-Mn-(Al)-C high-strength-and-toughness steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(8): 949-962. 章小峰, 万亚雄, 武学俊, 等. Fe-Mn-(Al)-C 高强度韧性钢氢脆微观机制的研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 949-962.
- [13] Fu Z H, Yang B J, Chen M, et al. Effect of recrystallization annealing treatment on the hydrogen embrittlement behavior of equimolar CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(9): 6970-6978.