

27SiMn 高强钢激光-MAG 复合焊接头组织和性能

史鹏飞¹, 黄 坚^{1,2}, 澹台凡亮³, 姚成武¹, 高 强⁴, 刘 虎³

¹上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

³山东能源重装集团大族再制造有限公司, 山东 泰安 271000;

⁴山东能源重装集团恒图科技有限公司, 山东 泰安 271000

摘要 利用光纤激光-金属活性气体(MAG)复合焊接方法焊接了 25 mm 厚的 27SiMn 高强钢,分析了焊接接头的微观组织和力学性能。结果表明,接头钝边焊道焊缝和热影响区主要为马氏体;填充焊道的焊缝主要由晶内针状铁素体、少量先共析铁素体和上贝氏体组成,其热影响区组织以马氏体为主。焊接接头硬度分布不均匀,钝边焊道硬度的最高值出现在焊缝;填充焊道硬度的最高值出现在粗晶区,母材的硬度最低。拉伸时接头均断于母材。冲击试验结果表明,钝边焊道焊缝的冲击断口存在脆性断裂区和韧性断裂区,填充焊道焊缝的冲击断口仅观察到韧性断裂区。

关键词 激光技术; 激光-MAG 复合焊接; 27SiMn; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1002001

Microstructures and Properties of 27SiMn High-Strength Steel Joints by Laser-MAG Hybrid Welding

Shi Pengfei¹, Huang Jian^{1,2}, Tantai Fanliang³, Yao Chengwu¹, Gao Qiang⁴, Liu Hu³

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China;

³Dazu Remanufacturing Co., Ltd., Shandong Energy Heavy Equipment Group, Taian, Shandong 271000, China;

⁴Hengtuo Technology Co., Ltd., Shandong Energy Heavy Equipment Group, Taian, Shandong 271000, China

Abstract 25 mm thick 27SiMn high strength steels are welded with the fiber laser-metal active gas (MAG) hybrid welding method, and the microstructures and mechanical properties of the welding joints are analyzed. The results show that the weld seam and heat affected zone of the root-face pass of the joints are mainly composed of martensite. The weld seam of the filler pass mainly consists of intragranular acicular ferrite, a small amount of pre-eutectoid ferrite and upper bainite, and the microstructure of the heat affected zone is mainly martensite. The microhardness distribution of welding joints is not uniform and the highest microhardness of the root-face pass is at the weld seam. The highest microhardness of the filler pass is in the coarse grain area, and the lowest microhardness is in the base metal. Tensile specimens are all broken in base metals. The impact experimental results show that the brittle fracture zone and toughness fracture zone exist in the impacted fracture of the weld at the root-face pass, while the toughness fracture zone is observed in the impacted fracture of the weld at the filler pass.

Key words laser technique; laser-MAG hybrid welding; 27SiMn; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-30

基金项目: 上海市重大技术装备研制专项(ZB-ZBYZ-03-11-0485)

作者简介: 史鹏飞(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: hebeispf@163.com

导师简介: 黄 坚(1967—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接方法和激光表面改性方面的研究。

E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

液压支架是煤矿开采的主要设备,液压缸决定液压支架的性能^[1-2]。27SiMn 高强钢是液压缸的主要材料,具有较高的强度和较大的淬硬倾向。液压缸的焊接只能单面施焊,目前一般采用传统电弧焊和多层多道焊工艺^[3-4]。然而,传统电弧焊方法存在焊接效率低、焊接热输入大、工件易变形等问题。因此,应用高效、低热输入的焊接方法对厚板高强钢的焊接具有重大意义。

光纤激光比 CO₂ 激光和 Nd:YAG 激光具有更稳定的光束质量、更高的电光转换效率,因而得到越来越广泛的应用^[5-7]。激光-熔化极气保护电弧复合焊接综合了激光自熔焊和熔化极气保护焊的优点,既减小了热输入又提高了焊接效率^[8-10]。朱晓明等^[11]采用 CO₂ 激光-金属稀有气体(MIG)复合焊接,进行了 20 mm 厚的船用高强钢焊接,结果表明,装配间隙大小对熔透能力有显著的影响。秦浩等^[12]采用激光-金属活性气体(MAG)焊接技术,实现了 16 mm 厚 1CrNi3MnMoV 低合金高强钢的多层焊接,结果表明,复合焊接的焊缝抗拉强度比母材的高 13%,焊缝的冲击断口存在脆性断裂区和韧性断裂区。印波等^[13]指出,调质态 27SiMn 钢运用 CO₂ 焊接时容易产生冷裂纹等焊接缺陷。为防止调质高强钢焊接裂纹,可采取焊前预热、层间温度控制和焊后热处理,或者在退火态施焊后进行调质处理。王颖等^[14]采用窄间隙埋弧焊技术,焊接了退火态的 27SiMn 钢,指出了窄间隙埋弧焊相比于 CO₂ 焊的优势,但焊缝主要为晶粒较粗大的块状铁素体,且拉伸试样断裂位置为焊缝。目前,关于厚度大于 20 mm 的 27SiMn 高强钢激光电弧复合多道焊接接头的研究鲜有报道。

本文采用光纤激光-MAG 复合焊接方法和单面、多层焊工艺,焊接了 25 mm 厚的退火态 27SiMn。同时,对激光-MAG 复合焊接方法及窄间隙坡口条件下焊接接头的组织、显微硬度、拉伸性能和冲击性能进行了详细分析,为后续的研究和工业应用提供了参考。

2 材料及试验方法

焊接采用的母材为 25 mm 厚的退火态 27SiMn 高强钢,试板长为 400 mm,激光-电弧复合焊接使用直径为 1.2 mm 的 GHS-70 焊丝,母材和焊丝的化学成分见表 1。从焊丝成分上看,一些微量合金元素的加入起到了细化晶粒的作用,同时焊丝的 Mn 和 S 元素质量分数比约为 181,进一步减小了焊缝裂纹倾向。

表 1 27SiMn 高强钢和 GHS-70 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 27SiMn high-strength steel and GHS-70 wire (mass fraction, %)

Item	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
27SiMn base metal	0.25	0.97	1.40	0.015	0.007	0.087	0.056	0.028
GHS-70 wire	0.08	0.60	1.45	0.005	0.008	—	—	—

焊接设备采用美国 IPG 公司的 YLS-10000-S2 多模光纤激光器和珠海 Fronius 公司的 TPS500 气保护焊机,激光焦距为 300 mm,聚焦后的焦点半径为 0.36 mm。保护气为 80%(体积分数,下同)Ar+20%CO₂。试验采用激光在前、电弧在后的焊接方式,激光束倾角为 5°,焊枪与工件表面夹角为 50°,光丝间距为 3 mm,焊接试验示意图如图 1 所示。采用类“Y”形坡口,坡口钝边高度为 12 mm,坡口底部宽度为 3 mm,窄间隙单

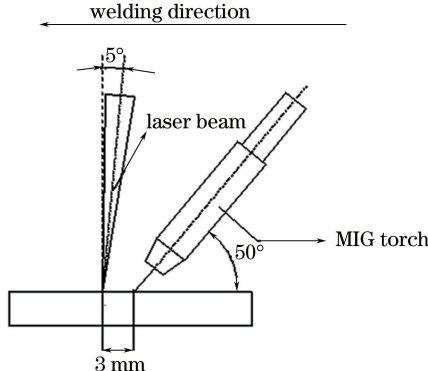


图 1 焊接试验示意图

Fig. 1 Schematic of welding experiment

边角度为 10° ，坡口及填充焊道示意图如图 2 所示。27SiMn 高强钢复合焊接工艺参数见表 2。焊接不采取预热措施，层间温度控制在 90°C 以下。

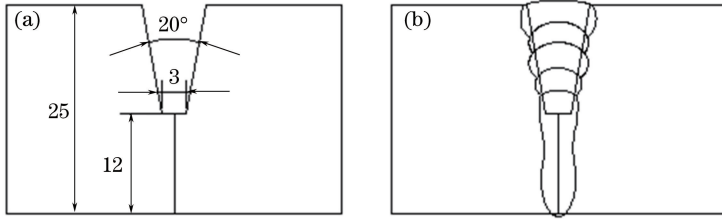


图 2 (a)坡口和(b)填充顺序示意图

Fig. 2 Schematic of (a) groove and (b) filling sequence

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of welding

Layer number	Laser power /kW	Welding speed /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Defocusing /mm	Welding current /A	Arc voltage /V
1	9.0	1.2	0	220	22
2	1.5	0.9	0	220	22
3-4	1.5	0.9	0	280	28
5	1.5	0.9	0	330	30

焊接完成后制取金相试样，并用体积分数为 2% 的硝酸乙醇腐蚀，采用德国 Zeiss 金相显微镜分别观察各层焊缝和热影响区的微观组织。采用全自动硬度计测量焊接接头的显微硬度，载荷为 1 kg，施压时间为 15 s。采用多功能材料试验机在室温条件下进行拉伸试验，试样的尺寸如图 3 所示。按照 GB2652-2008 标准制备出尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 的冲击试样。

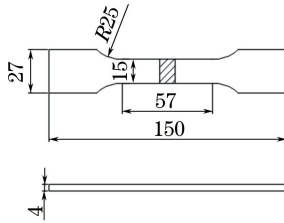


图 3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 Size of tensile sample

3 结果与分析

3.1 复合焊接接头的宏观形貌

通过 X 射线检测焊接后的试板，未发现明显气孔、夹渣和裂纹等缺陷，按 GB/T3323-2005 标准将焊缝评定等级为 I 级。27SiMn 钢焊接接头的宏观形貌如图 4 所示，可以看到，钝边焊道 9 kW 激光的深熔作用明

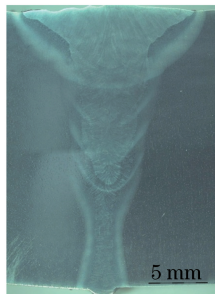


图 4 焊接接头的宏观形貌

Fig. 4 Macromorphology of welding joint

显,形成的焊缝深宽比较大;后续填充焊道焊接时,电弧起主导作用,激光起辅助作用,故激光产生的熔深不明显,焊缝宽度明显增加。

3.2 复合焊接接头不同区域的微观组织

焊接接头各区域的宏观金相图如图 5 所示,包括母材(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝(WSZ),热影响区又包括了粗晶区(CGZ)、细晶区(FGZ)和过渡区(TZ)。其中,填充焊道焊缝区包括重熔区(RZ)和非重熔区(NRZ)。

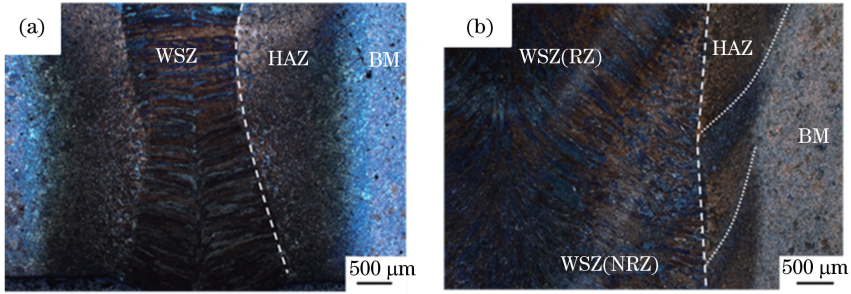


图 5 焊接接头各区域分布。(a)钝边;(b)填充焊道

Fig. 5 Zone distributions of welding joint. (a) Root face; (b) filler pass

焊接接头焊缝和母材的微观组织如图 6 所示。由图 6(a)可知,钝边焊道焊缝主要由母材和少量焊丝熔化形成,其化学成分主要受母材影响,焊缝含碳量较高,在实际冷却速度下,焊缝中形成了大量的板条马氏体(M)组织。由图 6(b)、(c)可以看出,非重熔区沿柱状晶的晶界分布着先共析铁素体(PF)和少量上贝氏体(B),晶内为针状铁素体(AF),而重熔区主要组织为沿柱状晶界分布的先共析铁素体和晶内针状铁素体,相比非重熔区,其晶界处铁素体减少,上贝氏体增加。由图 6(d)可知,母材的微观组织主要为上贝氏体组织。

钝边焊道和填充焊道热影响区的微观金相组织如图 7 所示。由图 7(a)、(d)可知,钝边焊道和填充焊道的粗晶区主要组织均为马氏体,钝边焊道在焊接热循环作用下形成了粗大的马氏体组织,填充焊道的晶粒尺寸相对较小。由图 7(b)、(e)可知,两个部分细晶区的原奥氏体晶粒均变细,冷却后形成的组织主要为晶粒较细小的回火马氏体和索氏体(S),少量针状铁素体和块状铁素体(GF)。由图 7(c)、(f)可以看出,两个部分的过渡区都主要分布着块状铁素体、少量针状下贝氏体和针状铁素体。

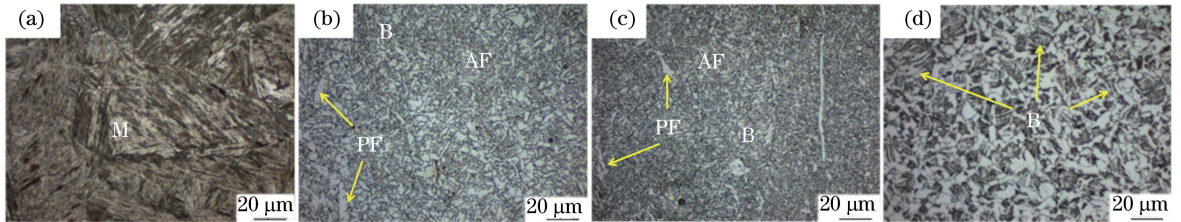


图 6 焊接接头焊缝区和母材的微观组织。(a)钝边焊道焊缝区;(b)填充焊道非重熔区;(c)填充焊道重熔区;(d)母材

Fig. 6 Microstructures of WSZ and BM of welding joint. (a) WSZ of root-face pass; (b) NRZ of filler pass;

(c) RZ of filler pass; (d) BM

3.3 复合焊接接头的性能测试及分析

3.3.1 显微硬度

焊接接头不同位置的硬度分布如图 8 所示,可以看出,在焊接接头下部的钝边焊道处,硬度最高的区域集中在焊缝区和热影响区的粗晶区,平均硬度高达 513 HV。因为该区域的组织主要为粗大的马氏体组织,细晶区的马氏体组织少于粗晶区的,因此硬度低于粗晶区的但仍高于母材的。焊接接头中部和上部的硬度分布趋势基本相同,从母材到焊缝中心先增大后减小,且均在粗晶区达到最大,焊缝的平均硬度分别为 261 HV和 256 HV,略高于母材的,主要因为焊缝中形成了大量的针状铁素体。焊接接头上部粗晶区的硬度值明显高于中部焊道的,二者的平均硬度分别为 490 HV 和 320 HV,这是由于中间焊道热影响区的粗晶区受后续焊道的再次热循环作用,马氏体组织得到了回火处理,而上部焊道的粗晶区未受到回火作用。

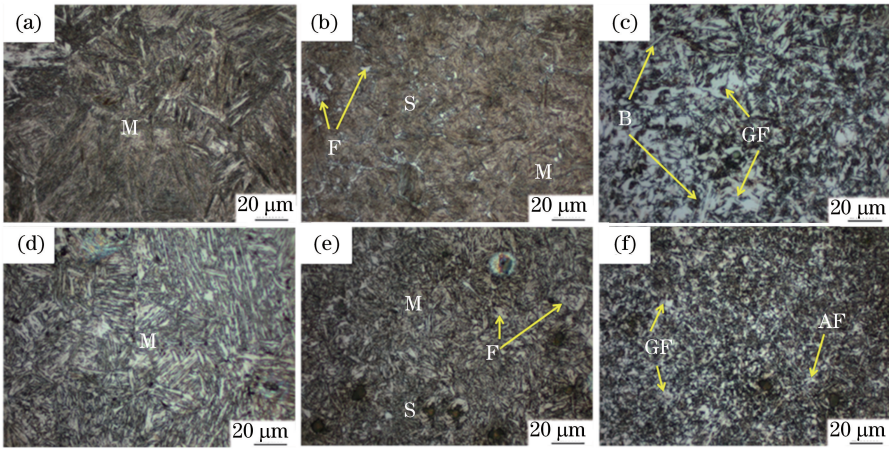


图 7 热影响区的微观组织。(a)钝边焊道粗晶区;(b)钝边焊道细晶区;(c)钝边焊道过渡区;(d)填充焊道粗晶区;(e)填充焊道细晶区;(f)填充焊道过渡区

Fig. 7 Microstructures of HAZ. (a) CFZ of root-face pass; (b) FGZ of root-face pass; (c) TZ of root-face pass; (d) CFZ of filler pass; (e) FGZ of filler pass; (f) TZ of filler pass

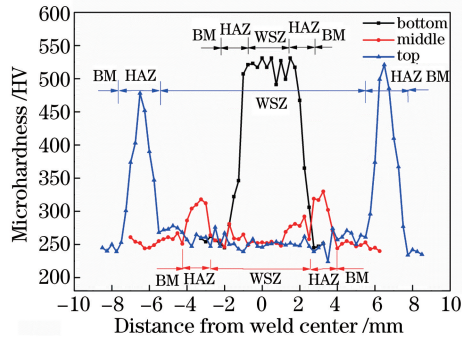


图 8 焊接接头不同位置微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distributions of welding joint at different positions

3.3.2 拉伸试验

依据 GB/T 2651 标准对焊接接头各区域部分进行拉伸试验,分别在试板的钝边焊道和填充焊道不同厚度层上各取三个拉伸试样,取三者平均值作为结果。拉伸试样宏观照片和试验结果如图 9 所示。结果显示,所有试样均断裂在母材上,表明焊缝强度高于母材的,符合 GB/T 12467 标准相关要求。焊后试样的屈服强度(σ_s)和抗拉强度(σ_b)与焊前母材的相近,但延伸率(δ)有所不同,钝边焊道拉伸试样的延伸率最低。

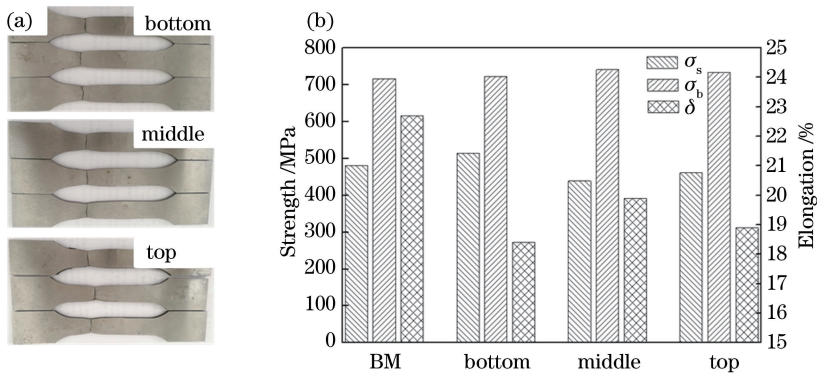


图 9 拉伸试验。(a)拉伸试样宏观照片;(b)拉伸试验结果

Fig. 9 Tensile test. (a) Macrophoto of tensile sample; (b) tensile test results

3.3.3 冲击试验

室温下焊接接头不同位置处冲击试验的结果见表3。结果显示,填充焊道焊缝区的冲击功最高,达到114 J;填充焊道热影响区的冲击功次之,为74 J;母材的冲击功最低。进一步观察发现,焊接接头的硬度梯度使得填充焊道热影响区的硬度比较高,冲击试样断裂路径向周围硬度较低处偏转,扩展路径变长,能量消耗增加,故填充焊道热影响区的冲击功偏高。对于填充焊道焊缝区而言,因为由低碳焊丝构成的填充焊缝组织主要为针状铁素体,而焊缝中针状铁素体的增加可显著改善焊缝金属的冲击韧性^[15]。通过扫描电子显微镜观察焊接接头不同位置处的冲击断口,其中钝边焊道焊缝区、钝边焊道热影响区和填充焊道热影响区的冲击断口均存在脆性断裂区和韧性断裂区,而填充焊道焊缝区的冲击断口未发现明显的脆性断裂区。钝边焊道焊缝的脆性断裂区、韧性断裂区和填充焊道的韧性断裂区的扫描结果如图10所示。由图10(a)~(c)可见,脆性断裂区有明显的河流状花样,同时存在一定的扩展裂纹,钝边焊道焊缝区的韧性断裂区存在一定数量的韧窝,且韧窝大而浅。填充焊道焊缝区的冲击断口存在大量小而深的网状韧窝,如图10(d)~(f)所示。

表3 焊接接头不同位置冲击试验结果

Table 3 Impact results of welding joint at different positions

Position	Impact energy /J	
Base metal	38	
Root-face pass	WSZ	44
	HAZ	62
Filler pass	WSZ	114
	HAZ	74

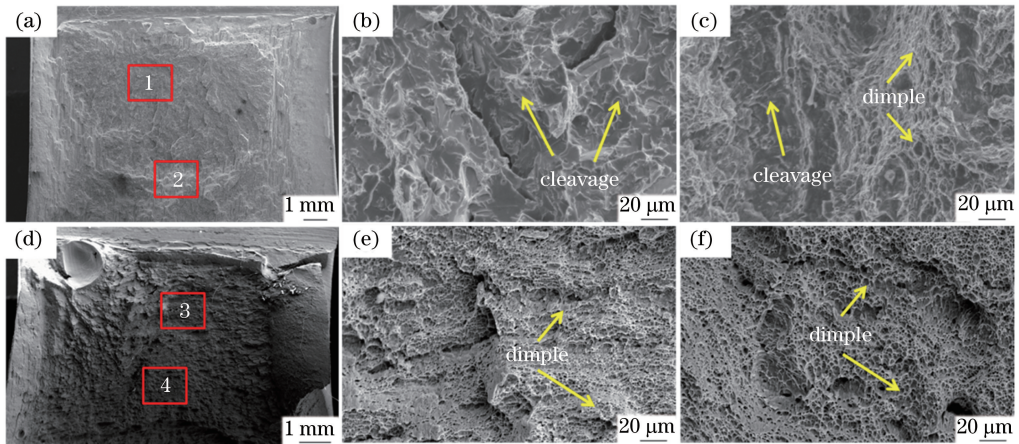


图10 焊接接头焊缝区的冲击断口微观形貌。(a)钝边焊道;(b)图10(a)中位置1的局部放大;(c)图10(a)中位置2的局部放大;(d)填充焊道;(e)图10(d)中位置3的局部放大;(f)图10(d)中位置4的局部放大

Fig. 10 Microstructures of impact fracture at WSZ of welding joint. (a) Root-face pass; (b) partially enlarged view of position 1 in Fig. 10(a); (c) partially enlarged view of position 2 in Fig. 10(a); (d) filler pass; (e) partially enlarged view of position 3 in Fig. 10(d); (f) partially enlarged view of position 4 in Fig. 10(d)

4 结 论

采用激光-MAG复合焊焊接了25 mm厚的27SiMn高强钢,发现钝边焊道焊缝区和热影响区的粗晶区组织主要为马氏体;填充焊道焊缝区的组织为沿晶界分布的少量针状铁素体和上贝氏体,晶内主要为针状铁素体组织,而其热影响区的粗晶区主要由回火马氏体组成。焊接接头钝边焊道的焊缝区和粗晶区的硬度最高,填充焊道则是粗晶区的硬度最高。焊接接头不同位置处的拉伸试验结果表明,焊接接头具有良好的抗拉强度。冲击试验结果显示,冲击断口呈现韧性断裂的特征。这些研究结论为液压油缸的焊接提供了一种新思路,后续将通过探究合理的热处理方案,进一步改善热影响区的组织和性能,避免出现粗大的马氏体。

参 考 文 献

- [1] Chen Yuan. Study on ultrasonic testing and evaluation of girth weld flaws for cylinders of hydraulic support used in coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
陈渊. 煤矿液压支架缸体环焊缝缺陷超声检测与评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [2] Dong Liangtai. Finite element analysis of hydraulic cylinder for hydraulic support[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
董良太. 液压支架用液压缸的有限元分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [3] Wang Liangzhong, Fan Zheliang. Hydraulic cylinder narrow gap welding technology research[J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(8): 95-96.
王亮忠, 樊哲亮. 液压缸窄间隙焊接工艺研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(8): 95-96.
- [4] Ren Zhilan. Welding of hydraulic cylinder[J]. New Technology & New Process, 2005(6): 52-53.
任芝兰. 液压缸体的焊接[J]. 新技术新工艺, 2005(6): 52-53.
- [5] Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.* Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503004.
李飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503004.
- [6] Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.* Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO₂ laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803002.
邹江林, 吴世凯, 肖荣诗, 等. 高功率光纤激光和 CO₂ 激光焊接熔化效率对比[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803002.
- [7] Xie Yufasheng, Huang Jian, Wang Wei, *et al.* Ultra-narrow gap laser wire filling welding forming defects of 5083 aluminum alloy thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0302008.
谢余发生, 黄坚, 王伟, 等. 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊成形缺陷研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302008.
- [8] Ji Yipeng, Chen Jiaqing, Jiao Xiangdong, *et al.* Laser-arc hybrid welding technique[J]. Welding Technology, 2009, 38(12): 1-7.
姬宜朋, 陈家庆, 焦向东, 等. 激光-电弧复合热源焊接技术[J]. 焊接技术, 2009, 38(12): 1-7.
- [9] Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680-1685.
- [10] Zhang Xiong, Li Shuo, Mi Gaoyang, *et al.* A study of 16MnDR steel thick plate narrow gap laser-MIG hybrid welding [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0103002.
张熊, 黎硕, 米高阳, 等. 厚板 16MnDR 窄间隙激光-MIG 复合焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103002.
- [11] Zhu Xiaoming, Cai Yan, Wu Yixiong. Research on laser-arc hybrid welding process of thick ship plates [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(21): 122-125.
朱晓明, 蔡艳, 吴毅雄. 大厚度船用高强钢激光-电弧复合焊技术研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(21): 122-125.
- [12] Qin Hao, Lei Zhenglong, Chen Yanbin, *et al.* Mechanical properties of laser-MAG hybrid welding on low alloy high strength steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003005.
秦浩, 雷正龙, 陈彦宾, 等. 低合金高强钢激光-MAG 复合多层焊接头力学性能[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003005.
- [13] Yin Bo, Qiu Wangbiao. Research on the welding process for 27SiMn[J]. Machinery, 2010(11): 72-75.
印波, 邱望标. 27SiMn 焊接工艺的研究[J]. 机械, 2010(11): 72-75.
- [14] Wang Ying. Studies on narrow gap pulse submerged arc welding process for 27SiMn hydraulic oil cylinder girth[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
王颖. 27SiMn 液压油缸环缝窄间隙脉冲埋弧焊工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [15] Liu Huijie. Welding metallurgy and weldability[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007: 94-120.
刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 94-120.