

厚板 16MnDR 窄间隙激光-MIG 复合焊接工艺研究

张 熊¹ 黎 硕¹ 米高阳¹ 王春明^{1*} 胡席远¹ 王雪芳² 张月来²

¹华中科技大学材料成型及模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²南车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412000

摘要 为实现 20 mm 厚 16MnDR 钢板的窄间隙焊接, 设计实验探究了钝边尺寸和坡口角度对焊缝成形及焊接效率的影响, 并对坡口尺寸进行优化。在此基础上, 采用单激光自熔焊打底, 多层多道激光-电弧复合焊填充的工艺实现了 20 mm 厚 16MnDR 钢板的窄间隙焊接。结果表明, 在该工艺条件下, 焊缝表面成形良好, 焊缝内部也没有明显缺陷产生, 与传统工艺相比, 焊接线能量降低 45%, 焊接效率提高 155%, 具有明显优势。对接头力学性能进行测试发现, 接头的抗拉强度略高于母材的抗拉强度, 满足强度要求, 且将接头弯曲至 180° 时, 接头处没有明显裂纹产生, 满足弯曲性能要求。

关键词 激光技术; 厚板; 窄间隙; 激光-电弧复合焊

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0103002

A Study of 16MnDR Steel Thick Plate Narrow Gap Laser-MIG Hybrid Welding

Zhang Xiong¹ Li Shuo¹ Mi Gaoyang¹ Wang Chunming¹ Hu Xiyuan¹

Wang Xuefang² Zhang Yuelai²

¹State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²CSR Zhuzhou Electric Locomotive Co, Ltd, Zhuzhou, Hunan 412000, China

Abstract In order to realize the narrow-gap welding of 20 mm thick plate 16MnDR steel, experiments are designed to study the effect of root faces and groove angles on welding process stability, weld appearances and welding efficiency, then optimize the size of the groove, on this basis, using autogenous laser as bottom welding, multi-pass multi-layer laser-MIG hybrid welding to fill the gap. The results indicate that the weld appearance is pretty good and there is no defects of internal weld. Comparing the welding heat input and welding efficiency of laser-MIG hybrid welding with traditional arc welding, the welding heat input of laser-MIG hybrid welding decreases by 45%, and the welding efficiency of laser-MIG hybrid welding increases by 155%. The tensile strength of the joint is slightly higher than that of the base metal, satisfying the strength requirement, and there is no crack while the joints are bent to 180°, meeting the yield strength.

Key words laser technique; thick plate; narrow gap; laser-MIG hybrid welding

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引 言

15 mm 以上厚板的焊接是舰船和列车等大型设备制造过程中的一个重点和难点工艺。传统弧焊坡口面积大, 焊接工程量大, 焊接效率低下, 同时焊接热输入量大, 焊接接头力学性能较差。近年来出现的窄间隙电

收稿日期: 2015-07-31; 收到修改稿日期: 2015-09-14

基金项目: 国家 973 计划(2014CB046703)、国家自然科学基金(51323009)

作者简介: 张 熊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光-电弧复合焊接方面的研究。E-mail: 1303395825@qq.com

导师简介: 王春明(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: cmwang@hust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: cmwang@hust.edu.cn

弧焊接、垂直气电自动焊接和电子束焊接等焊接方法,均因技术难度大、材料适应性差或对装备要求较高等种种原因而难以在中厚板焊接领域得到推广应用^[1-3]。

激光-电弧复合焊接将激光和电弧两种热源有机结合,既充分发挥了两种热源各自的优势,又能相互弥补自身的不足,具有大熔深,高效率 and 间隙适应性好等优点,是中厚板焊接的一个重要发展方向。Miikk 等^[1]通过多层多道 YAG 激光-电弧复合焊接方式实现了 316 L 奥氏体不锈钢的厚板焊接,并讨论了焊接过程中的热裂纹问题,Webster 等^[2]在欧洲煤钢研究基金资助下,和 Corus、FORCE 以及 Fraunhofer ILT 等研究机构一起,开展了厚板激光复合焊接工艺的研究,采用多道焊接最大熔深达到 30 mm, Hu 等^[3]通过研究焊接过程中离子体的行为以及电弧与等离子体的相互影响对坡口尺寸进行优化,并利用 CO₂ 激光器完成了 28 mm 厚板的多层多道焊接, Blecher 等^[4]利用近似几何模型成功预测了焊缝根部缺陷的产生范围,黄坚等^[5]采用 CO₂ 激光器,成功实现了 36 mm 厚低碳钢板的窄间隙激光-MIG 电弧复合多层对接焊,以及 35 mm 和 70 mm 厚低碳钢板的窄间隙激光填丝多层对接焊,焊接接头成形良好。

但从国内外相关文献来看,关于 16MnDR 厚板激光复合焊接的实际应用并不多见。究其原因在于这项技术的现有研究还存在工艺稳定性和适应性不足,接头质量和可靠性不易控制的问题。因此,为了进一步推动激光复合焊接在厚板焊接中的应用,本文针对列车转向架用 20 mm 厚 16 MnDR 激光电弧复合焊接工艺进行研究,为激光复合焊接在轨道列车行业的应用奠定基础。

2 实验材料与方 法

2.1 实验材料

实验材料选用 16MnDR 钢板,试样尺寸为 350 mm×150 mm×20 mm,选用直径为 1.2 mm 的 CHW-50C3 焊丝。母材及焊丝的化学成分如表 1 所示,实验中激光自熔焊所用的保护气为 Ar 气,激光-电弧复合焊所用保护气为 20% CO₂ 与 80% Ar 的混合气,保护气流量约 25~30 L/min。焊前对试样坡口附近 25 mm 范围内进行打磨除锈,并用干净的棉布蘸丙酮擦拭后采用激光点焊的方式将试件点固,焊接过程中用夹具将试件压紧固定。

表 1 16MnDR 钢及 CHW-50C3 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 16MnDR steel and CHW-50C3 wire (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu
Base metal	≤0.20	0.15~0.50	1.20~1.60	≤0.025	≤0.012	≥0.02	-
Wire	0.09	0.66	1.20	0.016	0.020	-	0.20

2.2 实验方法

实验中使用的激光器为最大功率可达 10 kW 的 IPG-10000 光纤激光器,激光工作头的焦距为 300 mm, 焦点直径为 0.48 mm。弧焊电源为 Fronius TPS4000 逆变电源,使用 ABB IRB4400/60 机器人搭载旁轴安装形式的复合焊接头进行焊接,如图 1 所示

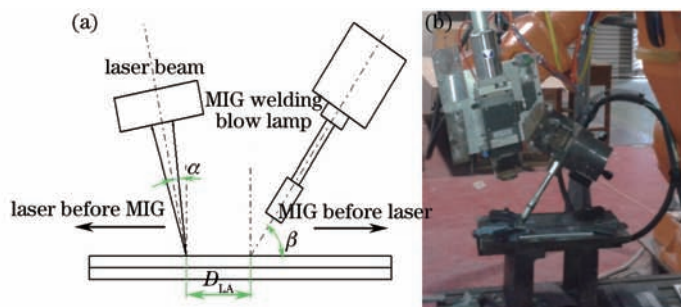


图 1 激光-MIG 复合焊接示意图及实际安装图

Fig.1 Schematic and the actual installation diagram of laser-MIG hybrid welding

本次实验对接接头坡口形式如图 2 所示,将采用单激光自熔焊打底,多层多道激光-电弧复合焊填充的方法完成焊接。

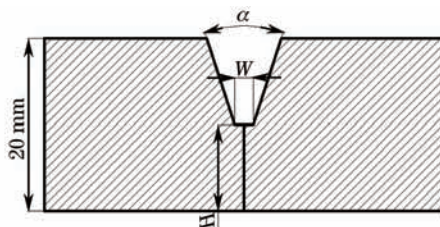


图2 坡口尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of groove

焊接过程中产生的氧化膜对焊缝缺陷的形成影响较大,为了提高焊缝质量,需在焊前对焊缝进行清理,具体步骤为:先用砂轮机进行打磨,清理坡口上的飞溅及氧化膜,再用钢丝刷清理掉坡口中残留的杂质,最后用丙酮清洗坡口表面,再进行下一道焊接。

3 结果与分析

3.1 坡口尺寸确定





3.1.1 钝边尺寸确定

钝边大小是影响焊缝成形的重要因素,钝边尺寸越大,焊接过程中所需的线能量就越大,想要通过一次焊接得到双面成型良好的焊缝的难度就越高;而钝边越小,后续需要激光-电弧复合焊填充的道数就越多,焊接效率就会越低。本次实验分别设计了钝边为 $H=10\text{ mm}$ 以及 $H=12\text{ mm}$ 的两种钝边形式,在每一种钝边条件下进行多次实验,实验结果如下:

当钝边尺寸为 $H=12\text{ mm}$ 时,采用如下工艺参数进行实验:激光功率 $P=8.5\sim 9.5\text{ kW}$,焊接速度 $V=0.8\sim 1.0\text{ m/min}$,离焦量 $\Delta f=-4\text{ mm}$,保护气(Ar)流量 25 L/min ,实验结果如表2所示。

表2 $H=12\text{ mm}$ 时焊缝背面成形

Table 2 Appearance of back weld when $H=12\text{ mm}$




Parameters	Appearance of back weld	Remarks
9.5 kW 0.8 m/min		Welding beading
9.0 kW 1.0 m/min		Welding beading
8.5 kW 1.0 m/min		Incomplete penetration
8.5 kW 0.8 m/min		Incomplete penetration

可以看到,在 9.5 kW 、 0.8 m/min 和 9.0 kW 、 1.0 m/min 的条件下,焊缝背面成形较差,出现了烧蚀以及焊瘤等缺陷;在此基础上降低线能量,在 8.5 kW 、 1.0 m/min 的条件下,焊缝背面完全未熔透,考虑降低焊接速度至 0.8 m/min 以提高线能量,焊缝背面成形略有改观,但仅有局部熔透,因此,当钝边 $H=12\text{ mm}$ 时,焊缝背面成形较差,难以找到合适的工艺参数。

将钝边尺寸降为 $H=10\text{ mm}$,采用如下工艺参数进行实验:激光功率 $P=7.0\sim 7.5\text{ kW}$,焊接速度 $V=0.9\sim 1.1\text{ m/min}$,离焦量 $\Delta f=-4\text{ mm}$,保护气(Ar)流量 25 L/min 。实验结果如表3所示。

表 3 $H=10\text{ mm}$ 时焊缝背面成形

Table 3 Appearance of back weld when $H=10\text{ mm}$

Parameters	Appearance of back weld	Remarks
8.0 kW 1.0 m/min		Welding beading
7.5 kW 1.0m/min		Good
7.0 kW 1.0 m/min		Incomplete penetration

从图中可以看出,在 8.0 kW、1.0 m/min 的条件下,焊缝背面成形不均匀,局部焊瘤产生,在此基础上,降低激光功率至 7.5 kW,焊接速度保持不变,可以发现,焊缝背面成形均匀且没有明显缺陷产生;而当激光功率降低至 7.0 kW 时,焊缝背面完全未熔透,因此,对接接头坡口钝边 $H=10\text{ mm}$ 时,采用 7.5 kW、1.0 m/min 的焊接工艺参数能够得到一次焊接,双面成形良好的焊缝。

3.1.2 坡口角度的确定

坡口角度是影响焊缝成形及焊接效率的重要因素,坡口角度过大,焊接效率就会偏低,坡口角度过小,又会产生干涉或导致电弧不稳,无法完成焊接。因此,在确保其他参数[板厚 $t_1=t_2=20\text{ mm}$,钝边厚度 $H=10\text{ mm}$,台阶宽度 $W=2\text{ mm}$,保护气(20% $\text{CO}_2+80\% \text{ Ar}$)流量 25 L/min]不变的前提下,在坡口角度分别为 $\alpha=40^\circ$ 以及 $\alpha=20^\circ$ 的条件下进行实验,观察不同条件下的焊缝成形,并在焊缝前、中、后三个区域切样观察焊缝横截面形貌,结果如下:

当坡口角度为 40° 时,实验发现,采用如表 4 所示的工艺参数能够得到成形良好的焊缝,焊缝表面成形及焊缝横截面形貌如表 5 所示。




表 4 $\alpha=40^\circ$ 时激光-电弧复合焊接工艺参数

Table 4 Parameters of laser-MIG hybrid welding when $\alpha=40^\circ$

Welding pass	Laser power /kW	Welding speed /(m/min)	Current /A	Wire laser distance /mm	Defocusing amount /mm
1	2	0.72	200	2	0
2	2	0.6	200	2	0
3	2	0.6	200	2	0
4	2	0.6	200	2	0

表 5 焊缝表面成形及不同位置横截面形貌

Table 5 Weld surface appearance and cross-sectional morphology

Position	Appearance
Upper weld	
Back weld	
Cross-sectional morphology	

从表中可以看出,在该焊接工艺参数下,四层四道激光-电弧复合焊可以填满坡口,焊缝上、下表面成形均良好,且在金相显微镜下观察焊缝横截面,并未发现焊缝内部存在明显缺陷。

当坡口角度为 20°时,焊接工艺参数如表 6 所示,焊缝表面成形及焊缝横截面形貌如表 7 所示。




表 6 $\alpha=20^\circ$ 时激光-电弧复合焊接工艺参数

Table 6 Parameters of laser-MIG hybrid welding when $\alpha=20^\circ$

Welding pass	Laser power /kW	Welding speed /(m/min)	Current /A	Wire laser distance / mm	Defocusing amount / mm
1	2	0.72	200	2	0
2	2	0.6	200	2	0
3	2	0.6	200	2	0

表 7 焊缝表面成形及不同位置的横截面图

Table 7 Weld surface appearance and cross-sectional morphology

Position	Appearance
Upper weld	
Back weld	
Cross-sectional morphology	

从表中可以看出,在该焊接工艺参数下,三层三道复合焊即可填满坡口,也能够得到表面成形良好的焊缝,在金相显微镜下观察焊缝横截面,也未发现焊缝内部存在明显缺陷。

通过对比上述两种不同坡口角度条件下的工艺参数和焊缝成形,可以发现,在 $\alpha=40^\circ$ 的情况下,四层四道激光-电弧复合焊可以填满坡口,得到成形良好,无明显缺陷的接头,而在 $\alpha=20^\circ$ 的情况下,三层三道激光-电弧复合焊即可填满坡口,同样能够得到成形良好,无明显缺陷的接头,但当 $\alpha=40^\circ$ 时,焊接成本相对较高,焊接效率相对较低,因此,坡口角度选择 $\alpha=20^\circ$ 。

综合上述实验结果可以确定,20 mm 厚板优化后的对接接头坡口尺寸如图 3 所示。

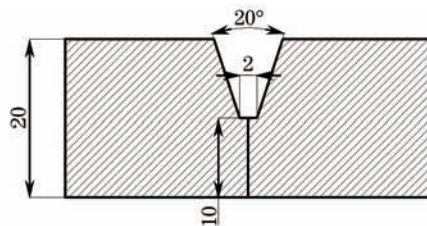


图 3 优化后坡口尺寸示意图(单位:mm)

Fig.3 Optimized schematic diagram of groove (unit: mm)

3.2 焊接工艺研究

3.2.1 激光自熔打底焊工艺

激光自熔打底焊工艺在上文确定钝边尺寸的时候也已经确定,具体工艺参数如表 8 所示。

表 8 激光自熔打底焊工艺参数

Table 8 Parameters of bottom autogenous laser welding

Laser power /kW	Welding speed /(m/min)	Defocusing amount /mm
7.5	1.0	-5

3.2.2 激光-电弧复合焊工艺

在上文确定坡口角度时采用的激光-电弧复合焊工艺能够得到成形良好的焊缝,但是由于焊接速度较慢导致焊接效率较低,因此考虑增大焊接速度,同时增大焊接电流以保证填充量,焊接工艺参数如表9所示,

表9 20 mm厚 16MnDR 钢板焊接工艺参数

Table 9 Parameters of 20 mm thick 16MnDR steel welding

Welding pass	Laser power /kW	Welding speed / (m/min)	Current /A	Wire laser distance /mm	Defocusing amount /mm
1	2.0	1.2	320	2	0
2	2.0	1.2	320	2	0
3	2.0	1.0	320	2	0

在该工艺条件下,最终能够得到满足成形要求的焊缝,但是在焊接过程中发现,在部分试样的第一道复合焊焊缝中心位置会有裂纹产生(如图4所示),而第二道和第三道复合焊均没有裂纹产生,这可能与焊接线能量和熔池行为有关,第一道复合焊熔池较窄较深,相同工艺参数条件下易形成裂纹。






图4 第一道复合焊焊缝中心裂纹

Fig.4 Cracks of the first laser-MIG hybrid weld

因此,降低第一道复合焊的焊接线能量,将电流减小至 280 A,并适当降低第二道复合焊的焊接速度以保证填充量,发现能够有效消除第一道复合焊产生的裂纹缺陷,三层三道复合焊也能够得到成形良好的焊缝。优化后的激光-电弧复合焊工艺参数及每层每道复合焊焊缝宏观形貌如表10所示。

表10 激光-电弧复合焊工艺参数及焊缝宏观形貌

Table 10 Parameters of laser-MIG hybrid welding and weld appearance

Welding pass	Parameters of laser-MIG hybrid welding and weld profiles	
1	Parameter	$P=2.0\text{ kW}, V_H=1.2\text{ m/min}, I=287\text{ A}, LL, D_{LA}=2\text{ mm}, \Delta f=-2\text{ mm}$
	Appearance	
2	Parameter	$P=2.0\text{ kW}, V_H=1.0\text{ m/min}, I=320\text{ A}, LL, D_{LA}=2\text{ mm}, \Delta f=-2\text{ mm}$
	Appearance	
3	Parameter	$P=2.0\text{ kW}, V_H=1.0\text{ m/min}, I=320\text{ A}, LL, D_{LA}=2\text{ mm}, \Delta f=-2\text{ mm}$
	Appearance	

结合激光自熔打底焊工艺参数,最终采用如表11所示的工艺参数,可以完成20 mm厚16 MnDR钢板的对接,通过观察如图5所示的焊缝横截面照片,发现焊缝内部也无明显焊接缺陷,满足成形要求。

表11 20 mm厚 16MnDR 钢板焊接工艺参数

Table 11 Parameters of 20 mm 16MnDR steel welding

Welding pass	Laser power / kW	Welding speed / (m/min)	Current /A	Wire laser distance / mm	Defocusing amount / mm
1	7.5	1.0	-	-	-5
2	2.0	1.2	287	2	0
3	2.0	1.0	320	2	0
4	2.0	1.0	320	2	0

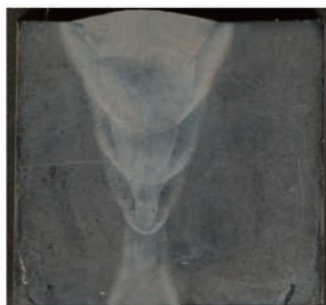


图 5 焊缝横截面宏观形貌

Fig.5 Weld profile of cross section

3.3 与传统弧焊工艺对比

用传统弧焊工艺焊接 20 mm 厚 16MnDR 钢板时,采用如表 12 所示的焊接工艺参数,四层四道弧焊也能够获得成形良好的焊缝。

表 12 20 mm 厚 16Mn 钢板传统弧焊工艺参数

Table 12 Parameters of 20 mm 16Mn steel submerged arc welding

Welding Pass	Current /A	Voltage /V	Welding speed /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	220~260	24~28	35~55
2			
3	240~280	26~30	30~45
4			

分别计算激光-电弧复合焊以及传统弧焊的线能量可以发现,传统弧焊的平均线能量为 39.94 kJ/cm,而激光-电弧复合焊的线能量为 21.96 kJ/cm,是弧焊的 55%;以长度为 350 mm 的 16MnDR 钢板为例,分别计算激光-电弧复合焊以及传统弧焊完成焊接所需的时间可以发现,弧焊所需的平均时间为 205.3 s,而激光-电弧复合焊完成焊接所需的时间为 80.5 s,是弧焊所用时间的 39%,即激光-电弧复合焊的焊接效率是弧焊的 255%。

因此,对于 20 mm 厚 16MnDR 钢板,在焊缝成形同样满足要求的条件下,与传统弧焊相比,激光-电弧复合焊的焊接线能量较小,焊接效率较高,具有较大优势。

3.4 焊缝质量测试

1) 射线检测

对两组激光-电弧复合焊接头分别进行 X 射线无损检测,结果如图 6 所示,X 射线检测均未发现焊缝内部存在明显缺陷。



图 6 接头 X 射线无损检测结果

Fig.6 Results of joint's X-ray inspection

2) 拉伸实验

在母材及激光-电弧复合焊对接接头上分别截取三个拉伸试样进行拉伸测试,试样的余高不保留,咬边缺陷未去除,拉伸试样尺寸如图 7 所示,焊接接头拉伸曲线及断裂位置如图 8 所示,三个试样中一个断在母材,另外两个试样由于咬边的存在,断在焊缝上。母材及焊接接头拉伸测试结果如表 13 所示,母材平均抗拉强度为 578.2 MPa,焊接接头平均抗拉强度为 586.5 MPa,因此,采用激光自熔焊打底,三层三道激光-电弧复合焊填充的工艺可以得到几乎与母材等强的焊接接头,满足焊接接头的强度要求。

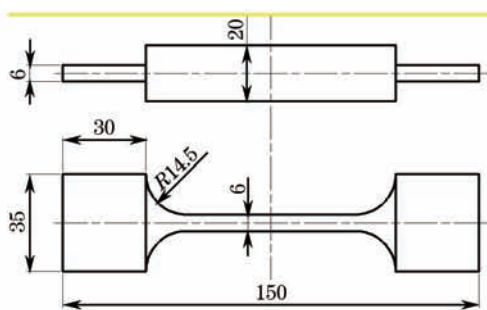


图7 拉伸试样尺寸示意图(单位:mm)

Fig.7 Schematic diagram of tensile samples (unit: mm)

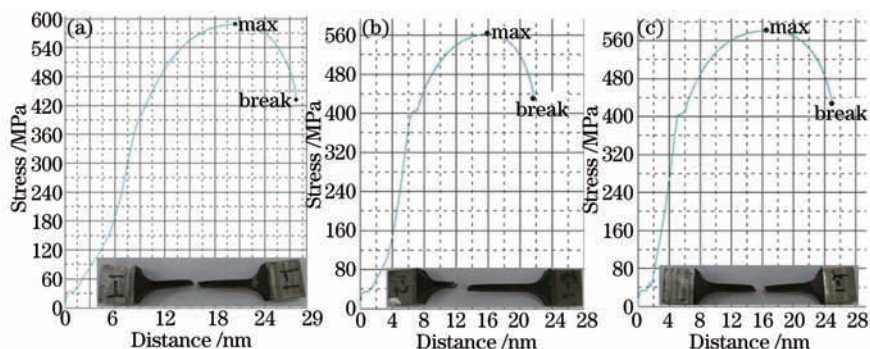


图8 拉伸曲线及拉伸试样形貌

Fig.8 Tensile curves and samples

表13 拉伸测试结果

Table 13 Results of tensile testing

Samples	Number	Fracture position	Tensile strength /MPa	
			Single-valued	Average
Joint	1-1	Weld	588.2	586.5
	1-2	Base metal	583.9	
	1-3	Weld	587.4	
Base metal	2-1	Base metal	588.8	578.2
	2-2	Base metal	564.0	
	2-3	Base metal	581.7	

3) 三点弯曲实验

在激光-电弧复合焊对接接头上分别截取三个弯曲试样进行三点侧弯实验,弯曲试样的尺寸如图9所示,压头直径为30 mm,辊筒间距离为40 mm,测试结果如图10,将试样弯曲至180°(卸载后略有回弹)时,三个

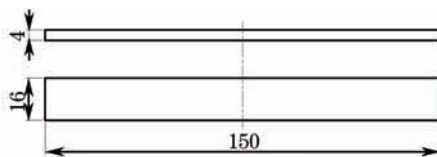


图9 弯曲试样尺寸示意图(单位:mm)

Fig.9 Schematic diagram of bending specimen (unit: mm)



图10 接头弯曲形貌

Fig.10 Bending appearance of the joint

试样均无裂纹产生,满足弯曲性能要求。

4 结 论

1) 对 20 mm 厚 16MnDR 钢板对接接头坡口尺寸进行优化,可以得到在钝边 $H=10$ mm,坡口角度 $\alpha=20^\circ$ 条件下,采用激光自熔焊打底,三层三道激光-电弧复合焊填充的工艺方法能够高效高质的获得表面成形良好且内部无明显缺陷焊缝的结论。

2) 对于 20 mm 厚 16MnDR 钢板,在焊缝成形同样满足要求的条件下,激光-电弧复合焊的线能量是传统弧焊的 55%,焊接效率是传统弧焊的 255%,具有较大优势。

3) 分别对 20 mm 厚 16MnDR 钢板激光-电弧复合焊对接接头进行 X 射线检测、拉伸测试及弯曲测试,发现焊缝内部并无明显缺陷,焊接接头的抗拉强度及弯曲性能均满足要求。

参 考 文 献

- 1 Karhu M, Kujanpää V. Experimental test set-up for studying hot cracking in multi pass laser hybrid welding of thick section austenitic stainless steel[C]. ICA-LEO, 2008: 535-544.
- 2 Webster S, Kristensen J K, Petring D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2008, 35(7): 496-504.
- 3 Hu L H, Huang J, Li Z G, *et al.*. Multi-pass welding of thick section steels using autogenous CO₂ laser welding and CO₂ laser-MIG hybrid welding[J]. China Welding, 2012, 21(4): 49-54.
- 4 Blecher J J, Palmer T A, Debroy T. Mitigation of root defect in laser and hybrid laser-arc welding[J]. Welding Journal, 2015, 94: 73-82.
- 5 Huang Jian. Progress of thick plate narrow gap multi-layer laser welding[J]. Metal working, 2013, (S2): 95-98.
黄 坚. 厚板窄间隙激光多层焊接技术进展[J]. 金属加工(热加工), 2013, (S2): 95-98.
- 6 Campana G, Fortunato A, Ascari A, *et al.*. The Influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1): 111-113.
- 7 Jia Jin, Yang Shanglei, Ni Weiyuan, *et al.*. Microstructure and properties of fiber laser welded joints of motor ultrahigh-strength steel 22 MnB5 and 22 MnB5-Q235[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003002.
贾 进, 杨尚磊, 倪维源, 等. 车用超高强钢 22 MnB5 及 22 MnB5-Q235 光纤激光焊接接头组织及性能的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003002.
- 8 Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803007.
- 9 Westin E M, Stelling K, Gumenyuk A. Single-pass laser-GMA hybrid welding of 13.5 mm thick duplex stainless steel[J]. Welding in The World, 2011, 55(2): 39-49.
- 10 Fukube H. High power fiber laser welding[J]. Technology Journal of the Japan Welding Engineer Society, 2005, 53(2): 100-106.

栏目编辑: 张浩佳