

中厚板激光-电弧复合焊拼板坡口的选用

张辉, 伍道亮, 师金凤, 游玉强, 屈江艳

招商重工(江苏)有限公司 江苏南通 226100

摘要: 研究了船用中厚板采用激光-电弧复合焊拼板时, 焊接坡口的选择方法。对20mm厚EH36船用钢进行焊接, 对比Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口3种形式的激光-电弧复合焊缝成形, 以及不同钝边高度和坡口角度激光-电弧复合焊缝成形的差异。分析不同坡口对激光-电弧复合焊缝成形、坡口制备难易度、焊接层数的影响。结果表明: 采用Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口这3种形式进行激光-电弧复合焊, 均可得到较好的激光-电弧复合焊缝成形。考虑坡口形式对坡口制备的难易度、对焊接层数的影响, 得出Y形坡口最优。当钝边高度值相同时, 若一定程度上增大坡口角度, 则利于激光-电弧复合焊缝正面的成形。当坡口角度相同时, 一定程度上降低钝边高度, 利于激光-电弧复合焊缝反面的成形。

关键词: 中厚板; 激光-电弧复合焊; 拼板; 坡口

Selecting the groove for hybrid laser arc welding butt joint of medium-thick plate

ZHANG Hui, WU Daoliang, SHI Jinfeng, YOU Yuqiang, QU Jiangyan

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226100, Jiangsu, China

Abstract: An investigation into the selection method of welding groove shapes during hybrid laser arc welding for marine medium-thick plates is presented. Testing with 20mm thickness EH36 grade steel plate, comparing the formation differences of hybrid laser arc welds in Y-shape, and U-shape with root face, and compound groove with root face. Moreover, comparing the forming differences of hybrid laser arc welds with varying root face and groove angle. An analysis of the influence of different grooves on the forming of hybrid laser arc welds, and the ease of preparing grooves, and the number of welding layers is also conducted. The findings indicate that acceptable forming can be achieved by employing Y-shape, and U-shape with root face, and compound grooves with root face. Taking into account the ease of groove preparation and the number of welding layers of different groove form, an optimal Y-shape groove is derived. It is observed that when root face value remains constant, an increase in groove angle to a certain extent is benefit to top formation of hybrid laser arc welds. When groove angle value remains constant, a reduction in root edge to a certain extent is benefit to back formation of hybrid laser arc welds.

Keywords: medium-thick plate; hybrid laser arc welding; panel; groove

1 序言

船用中厚板的拼板方法主要有传统电弧焊、气体保护焊及埋弧焊等。传统的焊接方式需要开设大

坡口角度, 进行多层多道双面焊接, 一方面会导致焊接效率较低, 另一方面过大的热输入量会使焊接结构产生热变形和残余应力。

第一作者: 张辉, 学士, 主要从事船舶与海工焊接技术研究及焊接工艺制作, E-mail: zhanghui9@cmhk.com。

激光-电弧复合焊作为一种高效创新的焊接方法，具有焊接速度快、热影响区窄、焊接变形及残余应力小等优点，在船厂逐渐得到应用^[1]。

船厂激光-电弧复合焊拼板的应用主要集中在薄板，随着焊接工件厚度的增加，焊接稳定性及焊接质量也在随之降低^[2]。通常船用中厚板的焊接，需要设计适当的坡口形式^[3]，如果坡口设计不合理，则焊接的稳定性和效率会受到不利影响，同时也增加了焊接缺陷产生的风险。

本文基于船用中厚板采用激光-电弧复合焊拼板的现状，采用激光-电弧复合焊方法，对船厂20mm厚EH36船用钢进行了焊接试验，研究了坡口选用对激光-电弧复合焊中厚板焊接质量的影响，为船厂中厚板的激光-电弧复合焊拼板应用提供试验依据。

2 试验材料及设备

试验采用厚度为20mm的EH36船用钢，交货状态为热机械轧制（TMCP），化学成分见表1，母材力学性能见表2。试验焊接材料选牌号G4Si1的实心焊丝，直径1.2mm，其化学成分见表3。根据熔敷金属试验，其力学性能见表4。

表1 试验用20mm厚EH36船用钢化学成分
(质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Ti	Mo	Ceq
0.149	0.25	1.18	0.016	0.003	0.024	0.001	0.01	0.01	0.01	0.02	0.001	0.35

注：CE=0.35%。

表2 试验用20mm厚EH36船用钢力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	V型缺口冲击吸收能量 (-40℃) /J			
			数值		平均	
			185	222	195	201

表3 焊丝化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti+Zr
0.07	0.83	1.42	0.018	0.017	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01

表4 焊丝熔敷金属力学性能

拉伸试验			冲击试验	
屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	温度 /℃	平均冲击吸收能量 /J
470	560	26	-30	100
			-40	90
			-50	70

试验中涉及到的激光-电弧复合焊设备包括光纤激光器，最大功率16kW，光斑直径0.3mm；直流脉冲焊接电源，型号PULSE600。试件放置在水平平台上，试件两侧通过琴键压紧固。激光-电弧复合的方式为电弧焊枪在前，激光头在后，激光复合焊枪直进行走，不摆动焊接。

3 试验方法及结果分析

3.1 不同坡口形式焊接试验

试验采用Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口3种形式，并控制钝边高度为8mm，观察不同坡口形式下激光-电弧复合焊焊缝成形特征。

Y形坡口面角度15°，如图1a所示；带钝边的U形坡口底部R6mm圆弧过渡，上部坡口面角度5°，如图1b所示；带钝边的复合形底部坡口面角度15°，上部坡口面角度30°，如图1c所示。坡口采用机械加工方式制备，坡口边的加工残留毛刺、卷边等用手工锉刀修整光顺。

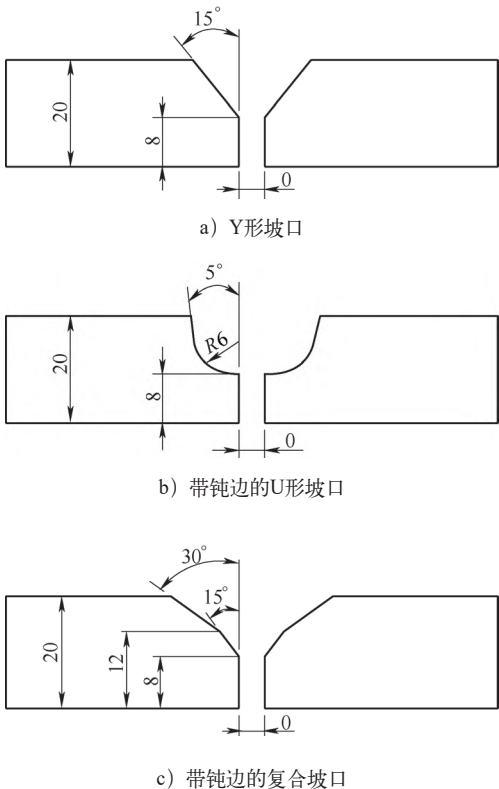


图1 不同坡口形式及尺寸

在正式焊接前，试板被琴键压在同一高度的钢制平台上，调整根部间隙至0，在试板尾部用纯激光进行定位焊，激光功率2kW，离焦量0，焊接速度300cm/min，定位焊长度150mm。正式焊接时采用

的焊接参数见表5。

表5 试验用焊接参数

焊接速度 / (cm/min)	激光功率 /kW	离焦量 /mm	电弧电压 /V	焊接电流 /A	保护气体	气体流量 / (L/min)
200	10	0	22~24	240 ~ 250	80%Ar + 20%CO ₂	20~30

不同坡口形式下激光-电弧复合焊焊缝正面成形如图2所示。由图2可知,当采用Y形坡口时,激光-电弧复合焊焊缝正面略不平整(见图2a);当采用带钝边的U形坡口时,激光-电弧复合焊焊缝正面饱满,呈凸面(见图2b);当采用带钝边的复合坡口时,激光-电弧复合焊焊缝正面略不平整(见图2c),与Y形坡口的激光-电弧复合焊焊缝正面相当。不同坡口形式下的激光-电弧复合焊焊缝反面成形都较好。

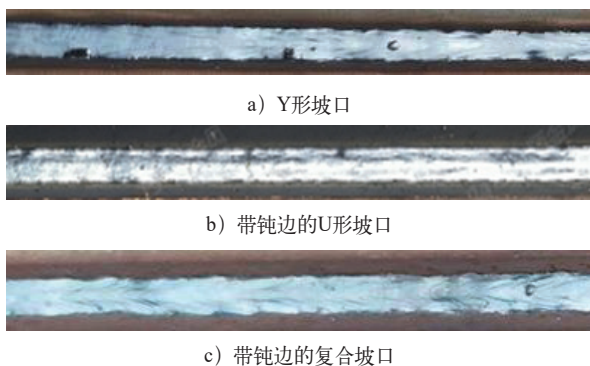


图2 不同坡口形式下激光-电弧复合焊焊缝正面成形

对比可知,采用Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口3种形式进行激光-电弧复合焊,均可得到较好的激光-电弧复合焊焊缝成形。由于激光-电弧复合焊的坡口精度要求高,因此坡口需采用机械加工方法制备,否则会影响激光-电弧复合焊焊缝质量的稳定性,带钝边的U形、带钝边的复合坡口这两种坡口形式复杂,坡口制备时间更长,对于船厂大批量中厚板拼板来说,不利于流水线生产作业。

3种坡口形式下坡口开口宽度,Y形坡口(见图3a)最小,仅9mm;带钝边的U形坡口最大(见图3b),达13mm;带钝边的复合坡口(见图3c)与带钝边的U形坡口相当。由于带钝边的U形、带钝边的复合坡口这两种坡口宽度大,使得焊接层数增多,焊接变形量也相应增加,焊接的稳定性和生产效率会受到不利影响,同时也增加了焊接缺陷产生的风险。采用图3所示坡口尺寸焊接时,Y形坡口需要焊

接2层,焊缝横截面形貌如图4a所示;而带钝边的U形坡口需要焊接4层,焊缝横截面形貌如图4b所示。由于带钝边的复合坡口与带钝边的U形坡口开口宽度差不多,所以不再作对比。

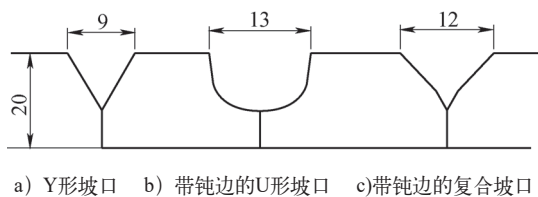


图3 不同坡口形式下坡口宽度

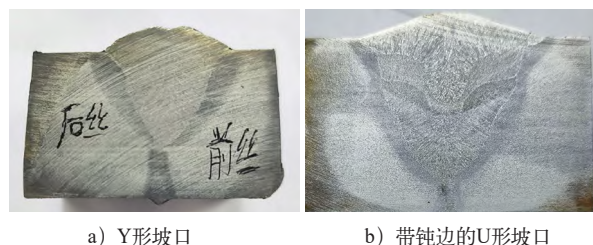


图4 不同坡口形式下焊缝截面形貌

3.2 不同坡口角度焊接试验

试验中接头形式为Y形坡口,如图5所示。试验控制钝边高度为8mm,改变坡口角度依次为30°、45°、60°,观察不同坡口角度下激光-电弧复合焊焊缝成形特征。

坡口采用机械加工方式制备,坡口边的加工残留毛刺、卷边等用手工锉刀修整光滑。在正式焊接前,试板被琴键压在同一高度的钢制平台上,调整根部间隙至0,在试板尾部用纯激光进行一段定位焊,激光功率2kW,离焦量为0,焊接速度300cm/min,定位焊长度150mm。正式焊接时采用的焊接参数见表5。

不同坡口角度下激光-电弧复合焊焊缝正面成形如图6所示。由图6可知,当坡口角度为30°时,激光-电弧复合焊焊缝正面细窄,焊缝与坡口面两侧咬边严重,呈锯齿状,成形差(见图6a),任取一个截面,得到的宏观照片如图7a所示,缺口较大;当坡口角度增大至45°时,激光-电弧复合焊焊缝正面中间略宽,仍有些凸起和两侧不平整(见图6b),任取一个截面,得到的宏观照片如图7b所示,缺口适中;当坡口角度继续增大至60°时,激光-电弧复合焊焊缝正面饱满,成形较好(见图6c),任取一个截面,得到的宏观照片如图7c所示,缺口较小。不同坡口角度下激光-电弧复合焊焊缝反面成形均较好。

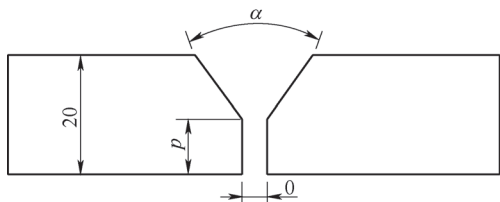


图5 焊接坡口形式及尺寸

注：α为坡口角度，p为钝边高度。



a) 坡口角度30°

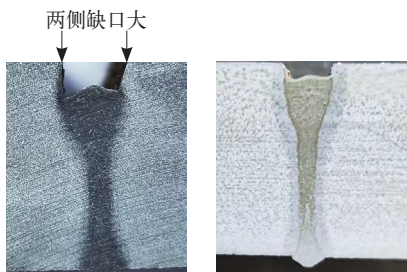


b) 坡口角度45°



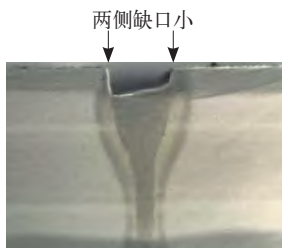
c) 坡口角度60°

图6 不同坡口角度下激光-电弧复合焊焊缝正面成形



a) 坡口角度30°

b) 坡口角度45°



c) 坡口角度60°

图7 不同坡口角度激光-电弧复合焊焊缝截面形貌

对比可知，增大坡口角度，激光-电弧复合焊缝宽度增加，成形更饱满顺滑，激光-电弧复合焊缝与坡口面侧壁形成的缺口更少，对后道的填充、盖面焊接更有利，避免产生层间缺陷或侧壁缺陷，如未熔合、未焊透。但是随着坡口角度增大后，坡口宽度必然会随之变大，当钝边高度一定时，由于是单面焊双面成形工艺，激光-电弧复合焊缝的高度和宽度不会无限制增加，所以若坡口角度过大，则无疑会增加焊接层数，焊接变形量也相应增加，同时增加焊接缺陷产生的风险，降低生产效率。因

此，一定程度上增大坡口角度，利于激光-电弧复合焊缝的正面成形。

3.3 不同钝边高度焊接试验

不同钝边高度焊接试验接头形式与不同坡口角度焊接试验相同（见图5）。试验控制坡口角度为45°，改变钝边高度依次为12mm、8mm、4mm，观察不同钝边高度下激光-电弧复合焊焊缝成形特征。

坡口采用机械加工方式制备，坡口边的加工残留毛刺、卷边等用手工锉刀修整光滑。在正式焊接前，试板被琴键压在同一高度的钢制平台上，调整根部间隙至0，在试板尾部采用纯激光进行一段定位焊，激光功率2kW，离焦量0，焊接速度300cm/min，定位焊长度150mm。正式焊接时采用的焊接参数见表5。

不同钝边高度下激光-电弧复合焊焊缝反面成形如图8所示。由图8可知，当钝边高度为12mm时，激光-电弧复合焊焊缝反面高度为-0.5~0.5mm，基本上是平的，存在断续的低于母材的地方（见图8a），不利于焊透；当钝边高度降至8mm时，激光-电弧复合焊焊缝反面高度为1mm，反面很平滑，没有低于母材的地方（见图8b）；当钝边高度降至4mm时，激光-电弧复合焊焊缝反面高度为3mm，反面很饱满圆滑（见图8c）。不同钝边高度下激光-电弧复合焊焊缝正面成形均较好。

对比可知，随着钝边高度的降低，激光-电弧复合焊焊缝反面越来越饱满，但是当钝边高度降的太多后，对铣边装配精度要求更高，激光-电弧复合焊焊缝容易被烧穿，激光-电弧复合焊焊缝熔敷金属厚度减小，也会增加焊接层数。

另外，对于中厚板，当钝边高度太小时，激光-电弧复合焊完成后，还需要双丝气体保护焊或埋弧焊填充、盖面，由于剩余未焊的深度较大，因此对后道的双丝气体保护焊或埋弧焊较为不利，当坡口角度一定时，极易出现坡口面或层间未熔合等缺陷。在激光-电弧复合焊打底和双丝气体保护焊盖面后，取任一截面得到的宏观形貌如图9所示。当钝边高度为12mm时，未出现坡口面或层间未熔合等缺陷（见图9a），而钝边高度为8mm时，明显可见有坡口面未熔合缺陷存在（见图9b）。由于钝边高度8mm已出现侧壁未熔合问题，所以钝边高度4mm不再作详细说明。

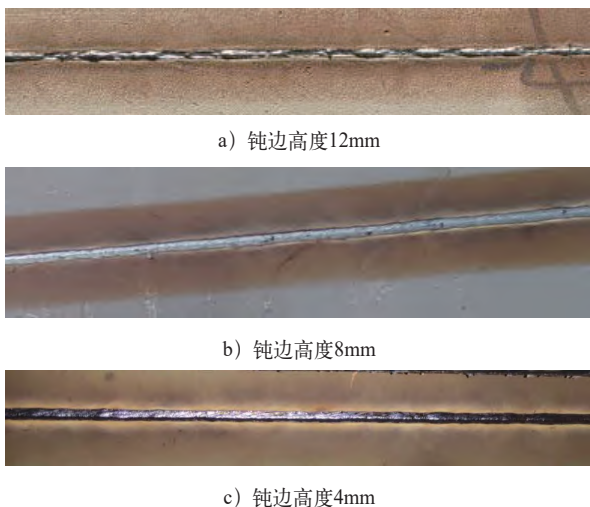


图8 不同钝边高度下激光-电弧复合焊焊缝反面成形

综上可知，一定程度上降低钝边高度，利于激光-电弧复合焊焊缝反面的成形。

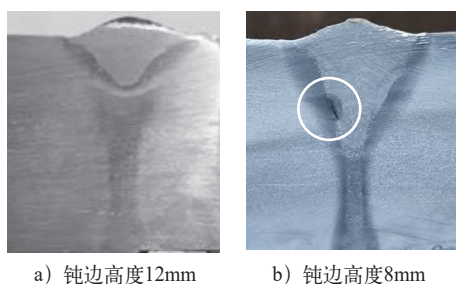


图9 不同钝边高度下焊缝截面宏观形貌

(上接第63页)

组立建造、组装过程焊接反变形和数据的监控，有效确保了罐体线型与鞍座结构线型一次匹配到位，如图9所示。同时，有效提高了各个环节施工效率，确保LNG罐体一次安装到位，无返工，减少了罐体的二次起吊和压膜工作，工作效率大幅度提升。



图9 罐体线型与鞍座结构线型一次匹配到位

5 结束语

针对大型鞍座钢结构预装精度的控制，以系列船的数据跟踪统计作为指导，为今后类似船型鞍座

4 结束语

1) 采用Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口3种形式进行激光-电弧复合焊，均可得到较好的焊缝成形。

2) 考虑坡口形式对坡口制备难易度、焊接层数的影响，得出Y形坡口最优。

3) 当钝边高度相同时，一定程度上增大坡口角度，利于激光-电弧复合焊焊缝正面的成形。当坡口角度相同时，一定程度上降低钝边高度，利于激光-电弧复合焊焊缝反面的成形。

参考文献：

- [1] 罗高翔，李超，喻军，等. 船用薄板激光-电弧复合焊工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2023（4）：14-17.
- [2] 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.
- [3] 解赞华，杨海峰，王旭友，等. 坡口尺寸对激光电弧复合焊接头特性影响[J]. 机械制造文摘（焊接分册），2019（5）：29-32，43.

MW 20240602

的预装控制提供了技术支撑，积累了宝贵的数据经验，同时也推动了大型鞍座钢结构的安装阶段工序前移，为缩短船舶建造周期、提高生产效率、改善施工环境奠定了技术基础。

参考文献：

- [1] 庄科挺，赵寅，刘文华. C型LNG液罐与船体的连接结构研究[J]. 船舶设计通讯，2015（S2）：20-25.
- [2] 张乐佑，王兰，刘志淇，等. 气体运输船液货罐鞍座分段预装精度控制工艺：“2022年度船舶先进制造工艺技术学术交流会”论文集[C]. 北京：中国造船工程学会，2022：124-129.
- [3] 郭景浩，刘志淇，王兰. LNG货罐与C型鞍座安装匹配精度控制：“2021年船舶先进制造工艺技术学术交流会”论文集[C]. 北京：中国造船工程学会，2021：342-347.
- [4] 张林线，龚容，杨维. LPG船液罐鞍座分段定位精度控制分析和应用[J]. 造船技术，2015（3）：35-38.

MW 20240409