

激光切割和激光焊接技术在造船工业中的应用

季节, 付娟, 赵勇, 邹家生

江苏科技大学先进焊接技术省级重点实验室, 江苏镇江 212003

摘要: 激光焊接技术作为激光加工技术的研究热点之一, 近年来在船舶制造领域的应用引起各国的广泛关注。本文综述了激光切割和激光焊接技术的基本原理和技术特点, 介绍激光切割和激光焊接技术在国内外船舶制造领域的发展及应用现状, 对比分析了激光切割和激光焊接与传统方法的优势, 并提出深入研究激光切割和激光焊接工艺在造船工业中应用的必要性。

1 概述

近年来, 我国造船产业发展迅猛, 在造船模式、总产量和国际竞争力等方面实现了快速发展, 船舶制造能力和水平明显提高, 造船核心设施能力国际领先。由于机器人在造船生产上的广泛应用和计算机综合制造系统的快速发展, 使得传统的切割方法不能满足自动化焊接和高精度装配的要求。国内主流船厂普遍采用的焊接方法为埋弧焊和半自动气保焊两大类, 但由于焊接自动化程度低, 焊接热输入量大, 使得船体结构焊接后产生较大的热变形。因此, 为了更好的提高切割和焊接质量, 越来越多的船厂开始引进激光切割焊接设备。

激光是 20 世纪人类最重要的发明之一, 其具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性的特征^[1]。自世界上第一台激光器问世以来, 激光已被广泛用于各行各业。激光加工技术具有普通加工技术所不能比拟的优势: 激光与工件无接触、热影响小; 激光光束能量密度高, 加工速度快; 生产效率高, 加工质量稳定^[2]。激光加工逐渐成为造船生产自动化过程中不可或缺的一部分。

2 激光切割

2.1 激光切割原理

激光切割 (Laser Cutting) 技术是利用聚焦后高能激光束对工件表面进行辐照, 使得辐照区的材料迅速熔化、汽化或分解, 同时借助同轴高压辅助气体吹走残渣, 形成切缝。在数控系统控制下, 激光按照既定的轨迹进行切割, 以实现材料任意成形^[3], 其原理如图 1 所示。

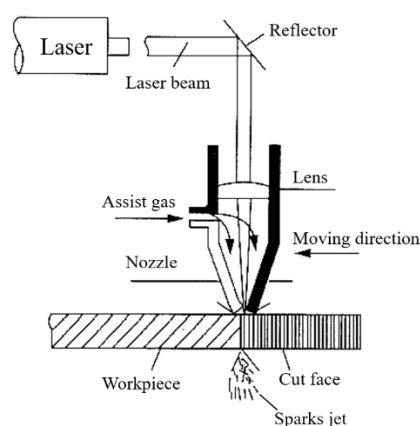


图 1 激光切割原理图

2.2 激光切割的应用

2004 年南通中远川崎船舶工程有限公司引进了两台激光切割机，激光振荡器的输出功率为 6000W，对低碳钢厚板 I 型、V 型坡口进行切割。实践发现激光切割机切割下来的零件变形很小，给装配、焊接、矫正带来极大的方便。激光切割机还可以无人控制，提高了工作效率^[4]。江南长兴造船基地也配备了大型“搭载式”数控激光切割机，如图 2 所示。

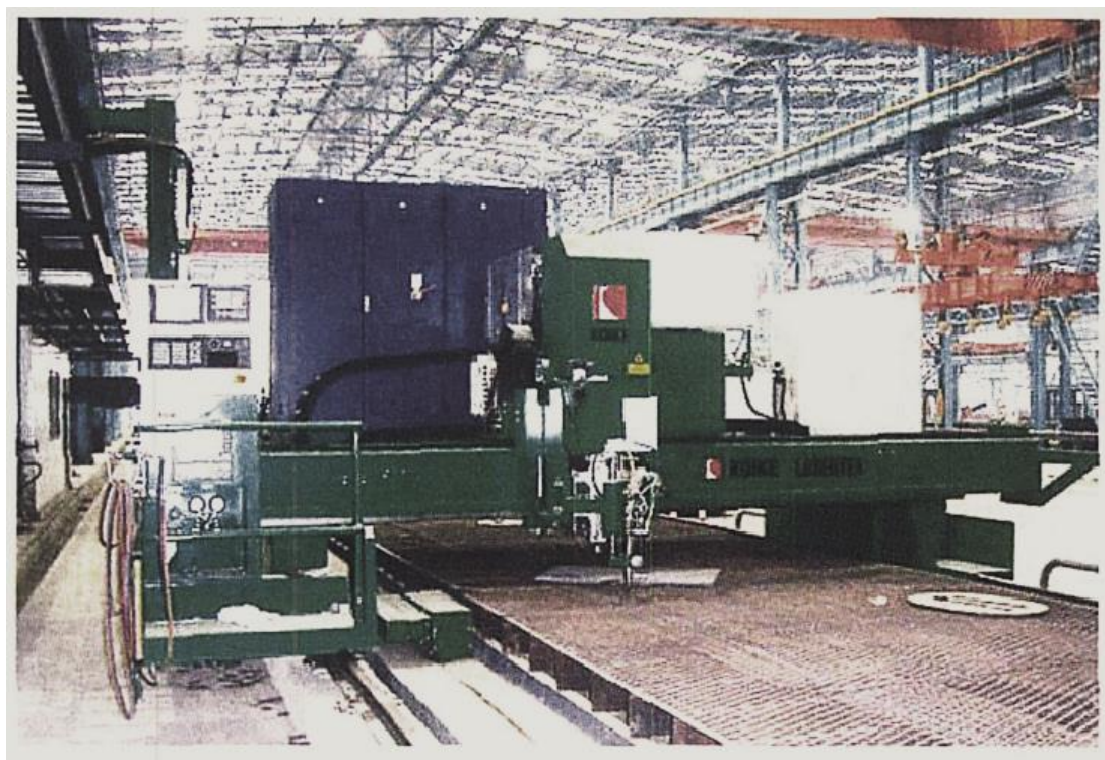


图 2 江南长兴造船基地安装日本 KOIKE 大型“搭载式”数控激光切割机

王德仓等人^[5]对 0.3mm 厚的冷轧钢板进行高速切割，发现激光功率 800W，

切割速度为 140mm/min 时，切缝断面纹理较窄，略有倾斜，表面粗糙度较好。
图 3 为不同切割速度的切缝形貌。

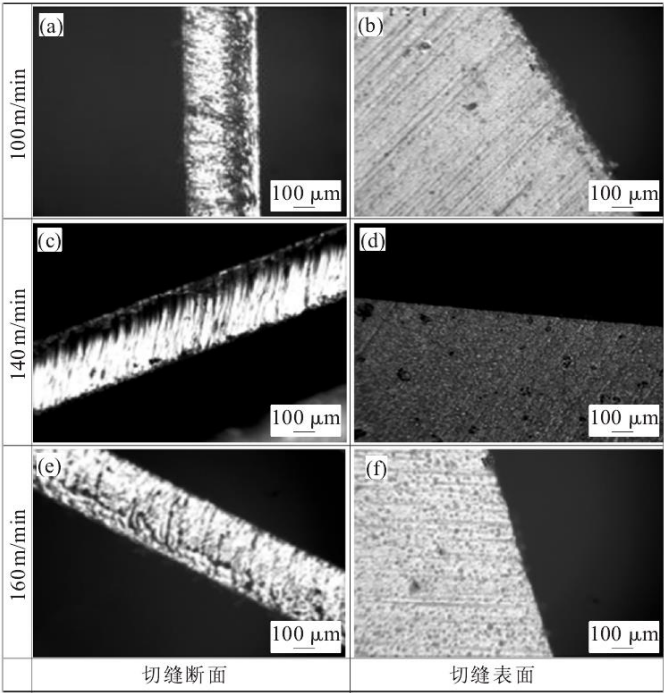


图 3 不同切割速度的切缝形貌

许天宇等人^[6]利用光纤激光切割机床对 20mm 厚的船用钢板进行切割，得出切割速度对切缝外观宏观形貌图如图 4 所示。发现切割速度为 1.5m/min 时，切缝宽度较大，背部有挂渣残留；切割速度为 2.0m/min 时，切缝较小，切割质量较好；切割速度为 2.5m/min 时，部分地方没切透且横切面挂渣严重。

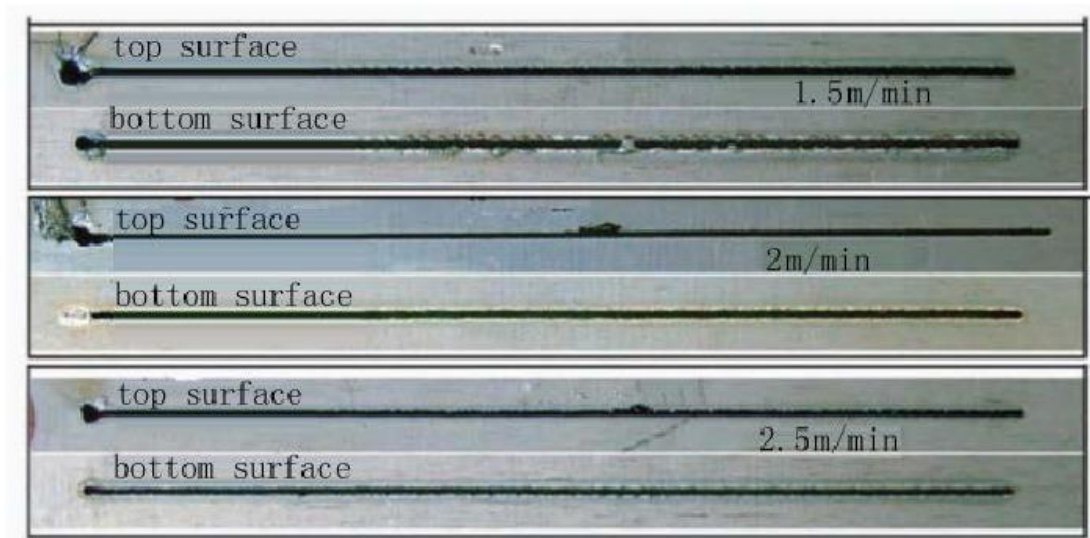


图 4 切割速度对切缝外观质量的影响

陈希章等人^[7]研究了低碳钢在不同切割方式下切割速度与切割厚度的关系，

低碳钢在不同切割方式下切割效果分别如图 5 和表 1 所示。

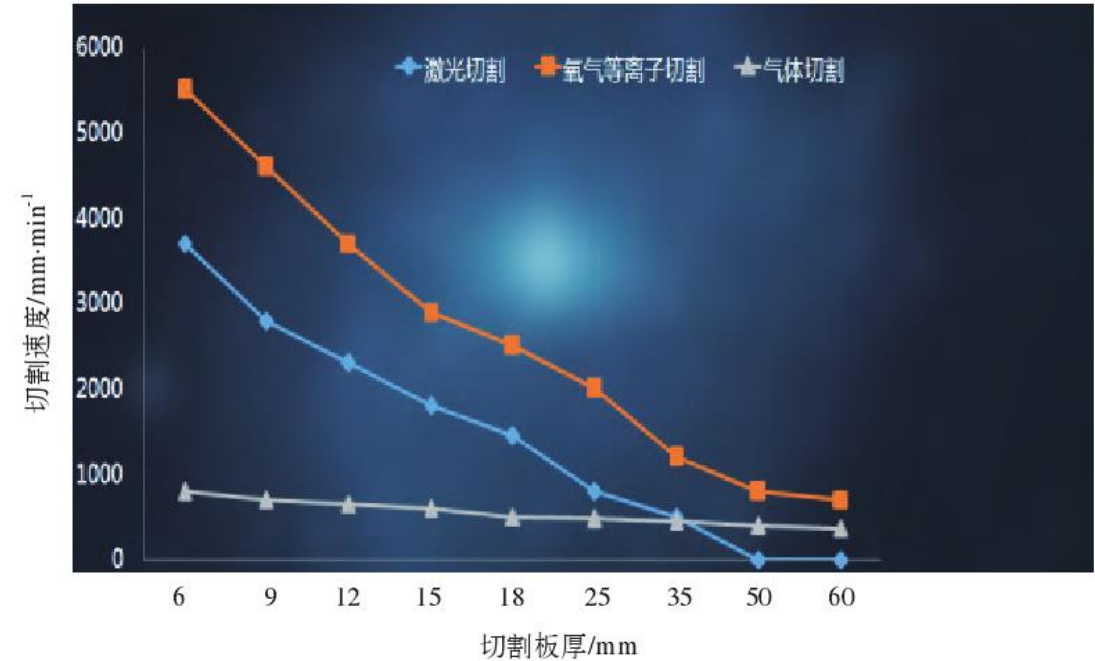
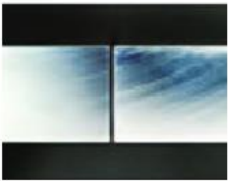
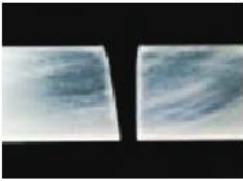


图 5 低碳钢在不同切割方式下切割速度与切割厚度的关系

表 1 低碳钢在不同切割方式下切割效果

切割方法	激光切割	等离子切割	气体切割
割缝			
割缝宽/mm	小：0.1~0.6	大：2.5~5	中：2~5
垂直度	良好	差	好
上缘	非常	差	良好
表面粗糙度/ μm	6.3	12.5	25
切割面颜色			

国外方面，德国的 Blohm & Voss 船厂是世界上第一家将激光切割和焊接应用于船体结构建造的船厂。Vosper Thornycroft 于 1992 年在欧洲船厂安装了第一台激光切割设备，德国 Meyer Werft 公司从 1994 年开始采用激光焊接与切割技术。20 世纪 90 年代后期，Meyer 船厂和丹麦的 Lindo 船厂已采用激光切割 25mm

厚钢板。在美国，Bender 船厂于 1999 年使用 6kW 的 Tanaka LMX III 激光切割设备，在制造成本和质量上取得了巨大进步^[8]。

3、激光焊接

3.1 激光焊接原理

激光焊接（Laser welding）技术是使用聚焦后的激光束照射到金属工件表面，利用其巨大的功率密度，使工件对接部分金属瞬时气化并在束流压力和蒸汽压力的共同作用下形成“小孔”。小孔内的金属蒸汽在高功率密度的激光作用下会发生电离，在小孔内部和上部形成一定量的高温等离子体，通过小孔效应将大部分光量传递给周围的材料使其熔透，在激光束的移动过程中，被熔透的金属迅速冷却，形成致密的焊缝组织^[9]。在生产实践中，人们通过多个热源的叠加或者设计窄间隙坡口形式，提高了板材的可焊厚度。目前，激光焊接主要可分为三种基本形式，即激光自熔焊、激光-电弧复合焊和激光填丝焊，如图 6 所示。

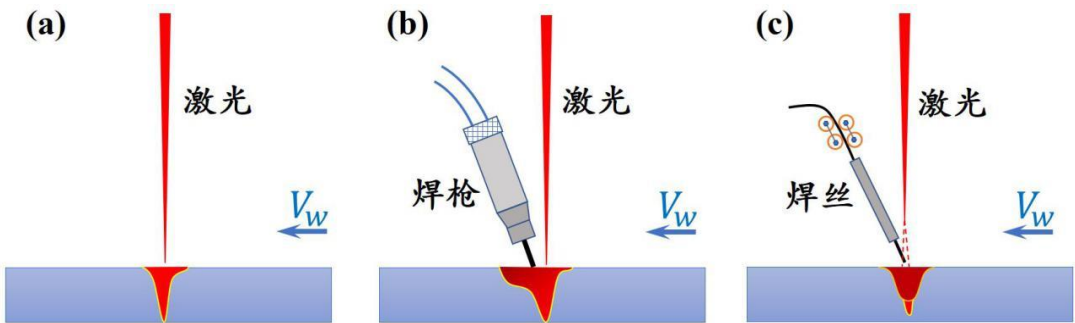


图 6 三种典型的激光焊接形式 (a) 自熔焊 (b) 复合焊 (c) 填丝焊

3.2 激光焊接的应用

肖健等人^[10]对船舰建造中所使用的板材进行激光焊接，发现零件装配是可使用激光焊代替手工电弧焊，保证对焊件有足够的约束力，在焊接过程中不致变形引起焊接缺陷，实现自动化焊接技术，如图 7 所示。在采用对接焊时，正面成型可以看出，焊缝前端成型良好，焊缝宽度小，但是沿着焊接方向，焊缝宽度明显变宽，焊缝背部出现焊瘤、烧穿的现象，如图 8 所示。在生产中遇到此情况可通过增加定位焊的数量或长度。



图 7 装配定位焊

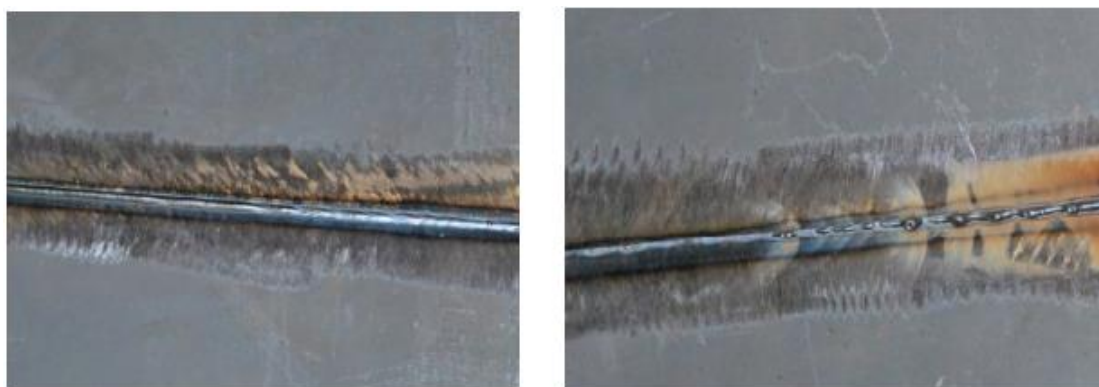


图 8 焊缝正面成型和背部成型

沪东中华造船厂采用 IPG-10000 型光纤激光器、Qutanta 焊接激光跟踪器、KUKA 焊接机器人、FRONIUS-VR700 送丝机和激光复合用 MIG 枪对对高新产品中常用的某型特种高强钢试板进行焊接试验。结果表明，与传统焊接工艺相比，激光焊在控制焊接变形、提高焊接效率等方面优势明显，使用激光焊代替传统焊接工艺，焊接总体效率可提高 50% 以上。经过一系列检测发现，对于激光焊接质量，不管是焊缝外观质量还是焊缝内部质量，均能达到高新产品的使用要求。图 9 为特种高强船用钢对接焊接头宏观形貌^[11]。

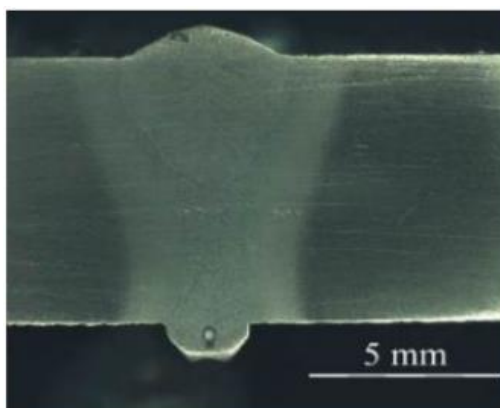
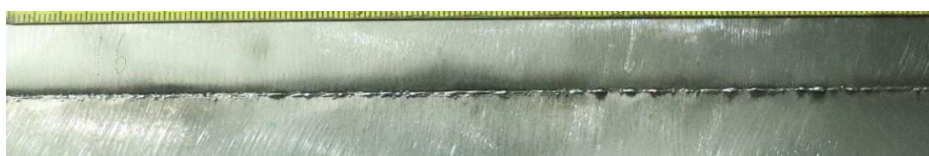


图 9 特种高强船用钢对接焊接头宏观形貌

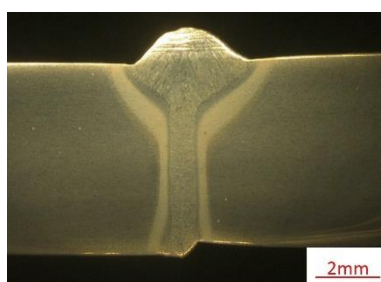
江苏科技大学付盼程^[12]对豪华邮轮上层建筑 6mm 薄板进行激光-MIG 复合高速焊,发现当激光率 5800W,焊接电流为 320A 进行对接焊时,最高焊速可达到 4.2m/min,焊缝表面成型良好无明显缺陷。图 10 为焊缝表面成型及宏观形貌。当采用 T 型接头时,最高焊速可达 3.9m/min。图 11 为焊缝表面成型及宏观形貌。



(a)焊缝正面

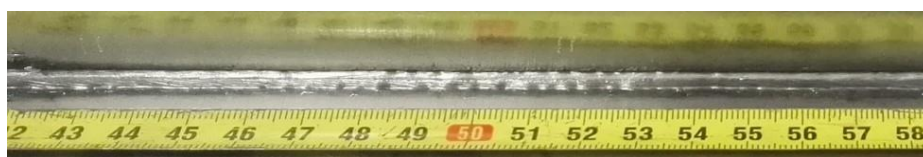


(b)焊缝反面

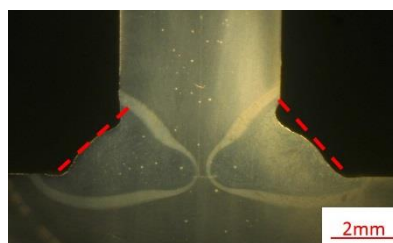


(c)对接接头宏观形貌

图 10 对接接头焊缝表面成型及宏观形貌



(a) T 型接头焊缝表面成型



(b) T 型接头宏观形貌

图 11 T 型接头焊缝表面成型及宏观形貌

除此之外,激光对于板材拼接、船体分段建造、船舶整体合拢也起到了重要作用,传统焊接方法焊接对接板时,由于焊缝收缩,焊接变形量较大,采用激光

复合焊接拼板，焊接速度可成倍加快，焊接变形却显著降低，实行“无余量”加工。分段合拢是一个全位置的焊接过程，过程很难控制，加上分度装配、坡口处理等因素，焊缝质量很难保证。激光焊接及激光复合焊接焊缝熔池较小，在适当的工艺条件下，能保证焊缝的背部成形质量，同时，激光焊接的焊缝晶粒细小，硬度较高，冲击性能优异，是分段单面焊双面成型焊接工艺理想选择。图 12 为激光焊在船舶建造中的应用。



(a)激光用于板材的拼接



(b)激光分段焊接



(c)激光焊接分段合拢

图 12 激光焊在船舶建造中的应用

国外方面，1994 年，德国梅耶尔造船厂（Meyer）首次在船舶制造行业使用激光-电弧复合焊接技术。采用激光-电弧焊接技术 Meyer 船厂在工件装配、单面焊双面成形领域取得重要突破，大大缩短了船体制造周期；1998 年，意大利芬坎蒂尼（Fincantieri）造船公司采用激光-电弧焊接技术，实现了分段船体对接焊；1999 年，德国罗兰造船厂（Roland）采用激光-电弧焊接技术，实现了金属装夹板的焊接；1998 年德国布罗姆与福斯造船厂采用激光-电弧复合焊技术进行分段船体的焊接；本世纪初，日本三菱重工长崎造船厂也在船体分段焊接领域中采用激光-电弧复合焊接技术。表 2 为 Meyer 船厂不同焊接方法的综合焊接性能对比^[13]。图 13 为日本三菱造船厂在船体焊接中的激光-电弧复合焊。

表 2 三种焊接方法对比

焊接类型	埋弧焊	激光添丝焊	激光-电弧复合焊
相对速度(%)	100	150	300
板厚(mm)	<12	<15	<15
间隙(mm)	2~5	0~0.4	0~1
变形(mm/m)	<1.5	<0.1	<0.2
疲劳	好	较难控制	很好



图 13 日本三菱造船厂在船体焊接中的激光-电弧复合焊

4、总结

船舶制造业作为劳动密集、资金密集、技术密集的重工业，在我国新一轮经济增长中起着至关重要的作用，各种先进的造船技术必将得到广泛应用。激光加工技术凭借高质量高效率的特点在造船生产中得到相当的重视，随着科技的发展激光技术将向大功率、智能化方向迈进。针对我国船舶制造业的特点，引进大功率激光器，开发具有自主知识产权的激光切割、焊接设备，对推动我国的激光加工技术在船舶制造的应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 关振中.激光加工工艺手册[M].北京:中国计量出版社,1997
- [2] 龚涛,缪凯,牟文广,等.激光加工技术在造船工业上的应用[J].武钢技术,2009(05):58-62.
- [3] 官邦贵,廖健宏,蒙红云,等.精密齿轮光纤激光切割工艺研究[J].应用激光,2005,25(6):365-368.
- [4] 罗文清,程舜麟.激光切割技术在我国造船业中的应用[J].造船技术,2007(06):34-35.
- [5] 王德仓,辛立军.激光高速切割工艺对薄板切割质量的影响[J].热加工工艺,2018,47(03):249-251.
- [6] 许天宇,刘怀亮,马修泉,刘庆.光纤激光切割碳钢工艺研究[J].机电工程技术,2020,49(03):174-176.
- [7] 陈希章,苏传出,程军辉.激光切割技术在船舶制造中的应用现状与发展趋势[J].金属加工(热加工),2018(03):1-4,9.
- [8] 丁伟康.激光切割技术的发展及其在造船业中的应用[C].上海市造船工程学会、江苏省造船工程学会、浙江省造船工程学会.第七届长三角地区船舶工业发展论坛论文集.上海市造船工程学会、江苏省造船工程学会、浙江省造船工程学会:浙江省科学技术协会,2011:153-163.
- [9] 陈辉.激光焊接关键技术的研究[D].山东大学,2012.
- [10] 肖健,黄健.激光焊在舰船建造中的应用分析[J].中国水运(下半月),2018,18(12):76-77.
- [11] 周飞,张御宇,沈军.激光焊在船舶行业的应用[J].船舶与海洋工程,2019,35(02):48-53
- [12] 付盼程.船舶上层建筑薄板激光-MIG复合高速焊工艺及接头组织性能研究[D].江苏科技大学,2019.
- [13] 辜磊,刘建华,汪兴均.激光-电弧复合焊接技术在船舶制造中的应用研究[J].造船技术,2005(05):42-44.



江苏船舶微信公众号, 欢迎关注, 欢迎投稿!