

激光焊接技术在轨道交通车辆中的应用

王洪潇 王春生 何广忠 高文文 程国利

(中车长春轨道客车股份有限公司工程规划发展部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘要 为解决轨道交通车辆不锈钢车体电阻点焊的外观质量差、密封性差、效率低等缺点,对部分熔透激光焊接工艺在不锈钢车体焊接中的应用开展了研究。研究包括:部分熔透激光叠焊原理、参数优化试验、显微组织分析、疲劳性能分析,以及激光焊接不锈钢车辆侧墙的结构改进。研究结果表明,不锈钢车体焊接中采用部分熔透激光叠焊工艺,可以获得高质量的表面状态及疲劳强度,车体结构强度高于EN 12663标准中的要求。

关键词 轨道交通车辆; 不锈钢车体; 激光焊接

中图分类号 U270.6; TG456.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.04.021

Application of Laser Welding Technology in Rail Transit Vehicles

WANG Hongxiao, WANG Chunsheng, HE Guangzhong, GAO Wenwen, CHEN Guoli

Abstract In order to solve the defects in resistance spot welding of the stainless steel rail vehicles, such as the poor appearance, poor sealing and low efficiency, the application of partial penetration lap laser welding technology in rail transit stainless steel vehicle car-body welding is studied, including the principle of partial penetration laser stack welding, parameter optimization test, micro-structure analysis, fatigue performance analysis and the structural improvement of laser welding stainless steel vehicle sidewall are systematically studied. The research results show that the surface condition and fatigue strength of the car-body are improved, the car-body structural strength is higher than the requirements of En12663 standard.

Key words laser welding; stainless steel railway vehicle; structure improvement; fatigue performance

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, China

不锈钢轨道客车具有车体重量轻、防腐性能好、制造工艺简单、维修工作量少、安全性能好、有利于环保等优点,因此,不锈钢轨道客车的开发已

成为欧美、日本等工业发达国家轨道交通业的重要发展战略。

目前,以激光焊接为代表的先进焊接技术正在推动轨道交通车辆制造业迈入新的发展时代。激光焊接具有形状变形小、热影响区小、焊接速度快、焊缝熔深大等优点^[1],近年来已在我国得到了广泛的应用。激光焊接应用于不锈钢轨道交通车辆,凭借其焊接接头质量稳定、焊接速度快、焊接变形小等优点,使得产品的焊接效率和焊接质量大幅提高,促进了产品的结构改造升级,达到了不锈钢车辆轻量化的目标。

开展激光焊接技术在不锈钢轨道车辆中的应用研究,旨在突破国外轨道客车制造企业对我国的技术封锁,填补我国轨道交通车辆激光焊接技术的空白。通过自主研发掌握不锈钢轨道交通车辆激光焊接核心技术,可以大量满足国内外市场对不锈钢轨道车辆的需求。

1 部分熔透激光叠焊工艺

不锈钢材料的热物理性质决定了不锈钢车体不适于电弧熔化焊接^[2]。不锈钢车体采用板梁组合、整体承载的全焊结构,为了不降低板材强度和减小焊接变形,需尽量采用电阻点焊。迄今为止,国内不锈钢轨道客车的车体一直采用电阻点焊结构,即通过组合不锈钢外板和骨架后,再用电阻点焊方法进行组装的方式。采用电阻点焊方法虽然能够大幅度降低车体的焊接变形,但由于焊点很多,容易产生外板变形,所以点焊变形成为了比较突出的问题;点焊对免涂装不锈钢车体外观质量难以提高;点焊结构车体密封性差,难以广泛用于高速动车组产品中。

部分熔透激光叠焊工艺是将激光束照射在工件上板,通过工艺参数控制使激光束贯穿上板,然后在熔入下板某一深度时中止,如图1所示。部分

熔透激光叠焊既保证了接头具有一定的强度,同时下板外表面不会发生焊接变形与变色。然而,由于强度与外观质量成反比,这使得控制强度与外观的平衡成为部分熔透激光叠焊工艺开发的难点。

采用 TEM 00 模式连续波(CW)盘式激光器(Trudisk 4002)进行不锈钢板激光焊接,额定功率为 4 kW,光束质量为 $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$,焦距为 200 mm,焦点最小直径为 0.6 mm,采用氩气保护。氩气流速为 30 L/min,喷嘴直径为 8 mm。1 mm+2 mm 组合式样的部分熔透激光叠焊如图 1 所示。由图 1 可见,焊接时将激光聚焦在试样表面,通过参数控制使激光束照射到材料中而不穿透,则可以保证试样表面没有焊接痕迹。

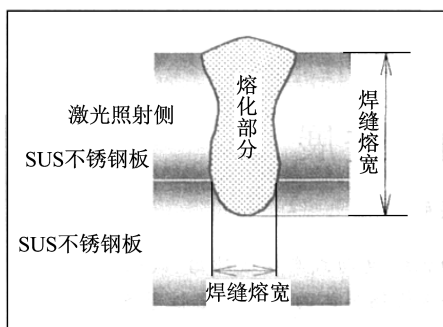


图1 部分熔透激光叠焊的工艺机理

2 部分熔透激光叠焊焊缝分析

在激光焊接过程中,材料在很短的时间内熔化、汽化,形成焊缝后迅速凝固,因此激光焊接与常规 GTA 焊接^[3]的显微组织不同。溶化金属首先在固液界面结晶,然后在熔合区内部迅速生长。由于固液界面存在较大的过冷度,熔合线晶体长大为与熔合线平行且垂直分布的柱状致密体(见图 2)。柱状枝晶向焊缝中心延伸,长大为等轴枝晶(见图 3),中心温度梯度小于周围温度梯度。如文献[4]所述,在焊接热循环再结晶过程中,中心等轴晶粒较细,且形状较好。

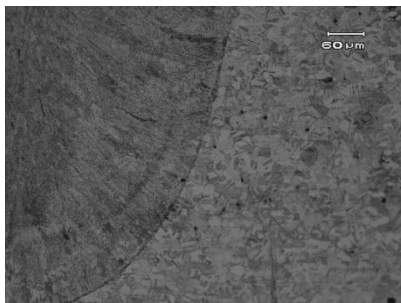


图2 部分熔透激光叠焊焊缝边缘柱状晶

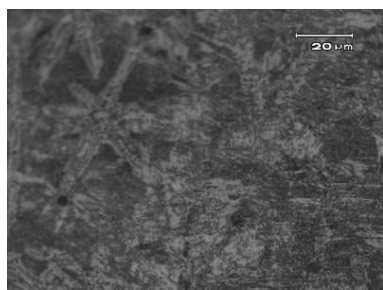


图3 部分熔透激光叠焊焊缝中心等轴晶

3 部分熔透激光叠焊参数优化

不锈钢薄板激光叠焊接头质量的两个重要评价标准是搭接接头的剪切载荷和下板外表质量。而焊缝熔深和焊缝熔宽又是影响这两个质量评价标准的重要参数。不锈钢薄板激光叠焊焊缝尺寸主要是由激光功率和焊接速度决定的,因此,合理匹配激光功率和焊接速度是控制焊缝成形并保证搭接接头剪切载荷和下板外表质量的主要途径。

在 7 个激光功率水平(800~1 400 W)、5 个焊接速度水平(20~40 mm/s)的共计 35 组焊接参数下的剪切载荷工况下,对下板外表质量进行了统计,绘制出如图 4 所示的不锈钢薄板激光搭接焊工艺窗口。

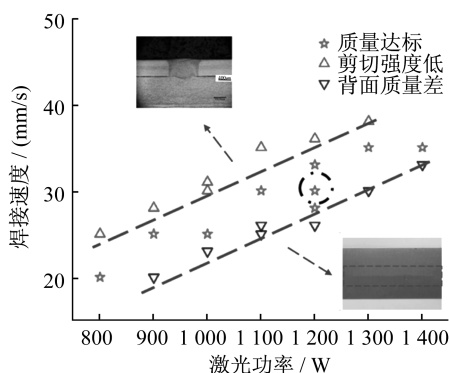


图4 不锈钢薄板激光搭接焊工艺窗口

在一定的功率条件下,当焊接速度较小时,线能量较大,熔深较大,会影响下板的外表面质量;当焊接速度较大时,线能量较小,会造成熔深不足,使得剪切强度难以保证。通过工艺优化研究,认为焊接线能量控制在 40 J/mm 左右对保证剪切强度和下板外表质量较为合适。综合考虑焊接速度对焊缝成形的影响,最终选择的焊接工艺参数为在光斑直径为 0.6 mm 的前提下,激光功率为 1 200 W,焊接

速度为 30 mm/s。

4 部分熔透激光叠焊疲劳性能测试

采用高频疲劳试验系统 (PLG-20D) 对 SUS301L 不锈钢电阻点焊和激光叠焊的接头进行疲劳试验,采用升降法获得了两种焊接接头的疲劳寿命曲线,如图 5 所示。试验结果表明,疲劳寿命循环次数为 10^7 时的 SUS301L 不锈钢搭接激光焊接接头疲劳极限为 4 543 N,是同循环次数电阻点焊接头疲劳极限 (2 758 N) 的 1.63 倍。

疲劳试验接头断裂分析表明,电阻点焊接头裂纹的位置是位于焊点的边缘,沿热影响区边缘扩

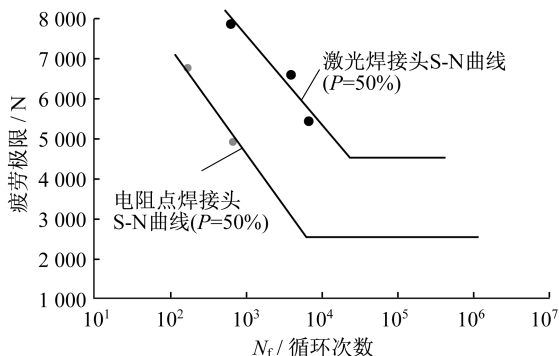
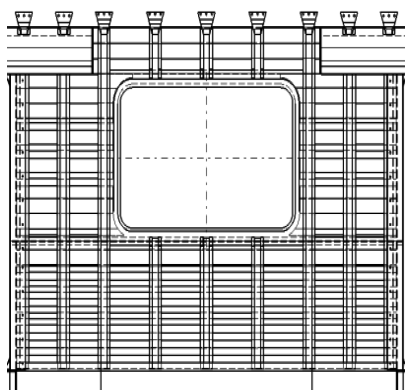


图5 电阻点焊与激光叠焊的疲劳寿命曲线对比



a) 激光焊侧墙二维模型



b) 激光焊侧墙实景

图6 激光叠焊车体侧墙结构

6 结论

1) SUS301L 不锈钢激光叠焊接头外表面美观,无焊接痕迹,剪切强度高于电阻点焊接头。

2) SUS301L 不锈钢激光叠焊接头的熔合区边缘为柱状晶,焊缝中心为对称树枝晶,焊缝未发现焊接裂纹等缺陷。

3) 疲劳寿命为 10^7 时 SUS301L 不锈钢搭接激光

展;激光叠焊接头裂纹产生在热影响区边缘,沿焊缝扩展。

5 车体结构改进

部分熔透激光叠焊技术用于轨道交通车辆不锈钢车体时,有必要针对激光叠焊的技术特点对车体侧墙结构进行改进。在新的激光焊接结构中,波纹板补强结构焊接在侧墙板上,立柱焊接在加波纹板上,如图 6 所示。这种结构避免了立柱与外墙板拉丝方向垂直接缝,提高了侧墙的平整度、美观度及强度。

新型不锈钢城轨客车表面焊缝采用无痕小尺寸部分熔透搭接激光焊。焊缝密度方面,由于单条焊采用激光焊技术,与原来的电阻点焊结构相比,焊缝密度提高了 20%。焊缝强度方面,单条焊缝强度高于电阻点焊接头强度标准值的 2 倍。安全余量方面,为提高安全余量,车体结构设计时按照车体纵向 50 mm—50 mm 段焊布置焊缝,相比 30 mm—70 mm 段焊布置焊缝,焊缝强度提高了 66%。

新型不锈钢城轨客车车体通过了整体静强度测试,说明激光叠焊车体的结构满足 EN 12663《铁路车辆车身结构要求》中的相关要求。

焊接接头的疲劳极限为 4 543 N,是电阻点焊接头疲劳寿命疲劳极限 (2 758 N) 的 1.63 倍。

4) 新型激光叠焊的结构上避免了与外墙板拉丝方向垂直的焊缝,提高了侧墙的平整度和强度,车体结构强度高于 EN 12663《铁道车辆车身结构要求》中的相关要求。

综上所述,通过开展激光叠焊部分熔透工艺方法的研究,提高了焊接接头的强度,改善了车体外

观质量,减少了不锈钢板去膜、除黑、防护等工序,进一步提高了生产效率。该技术已在北京地铁6号线、美国波士顿地铁项目及洛杉矶地铁项目中批量应用,填补了国内轨道交通车辆制造中激光焊接技术应用的空白,实现了轨道客车领域核心技术突破,对于提升产品在国内市场的竞争力具有重要意义。

参考文献

- [1] 赵明花. 城市轨道交通车辆不锈钢车体的研发[J]. 城市轨道交通研究, 2007(1):76.
- [2] 戴惠新,郑云昊,朱亚军,等. 轨道车辆车体底架用防火涂料

介绍[J]. 现代涂料与涂装, 2015, 18(1):33.

- [3] ARATA Y, MATSUDA F. Solidification crack susceptibility of Aluminum alloy weld metals (Report 1) characteristics of ductility curves during solidification by means of transverse strain test[J]. Trans JWRI, 1976, 5(2):35.
- [4] DAVID S A, BADU S S, VITEK J M. Welding: Solidification and microstructure[J]. JOM, 2003, 55:14.
- [5] LIU L M, ZHANG Z D, SONG G. Mechanism and microstructure of oxide fluxes for gas tungsten arc welding of magnesium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(3):649.

(收稿日期:2019-07-05)

(上接第64页)

2) 车轮和钢轨的辐射声功率随着速度的增加而增加,相同速度等级下,钢轨的声辐射总值显著大于车轮的声辐射总值。

3) 在计算频率范围内,钢轨的声辐射功率显著

大于车轮的声辐射功率。钢轨声辐射功率的显著频率为400~2 000 Hz。

4) 车体表面顶板和侧墙相同位置,隧道状态下的声学相应显著大于自由场状态下声学相应,底架区域自由场和隧道状态下的声学相应差异不大。

本文通过TWINS模型,研究了某城市轨道交通的车辆轮轨系统振动和声辐射特性,分析引起系统振动和声辐射特性的主要原因。所得结果对城市轨道交通环境噪声的控制具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 何宾. 高速列车车外噪声分布特征及车轮阻尼控制措施初步探讨[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [2] 韩光旭. 高速列车车轮非圆化对振动噪声的影响及演变规律研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [3] 刘玉霞,温泽峰,彭金方,等. 不同阻尼形式对车轮振动声辐射特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4):62.
- [4] 高文艳. 有砟轨道轮轨滚动噪声预测方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
- [5] 黄婧. 列车车轮振动与声辐射仿真分析[D]. 南昌:华东交通大学, 2014.

(收稿日期:2019-10-11)

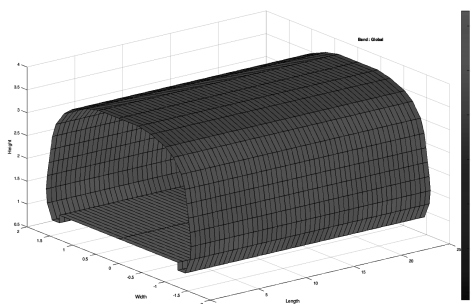


图7 自由场状态下车体表面声场仿真分析结果

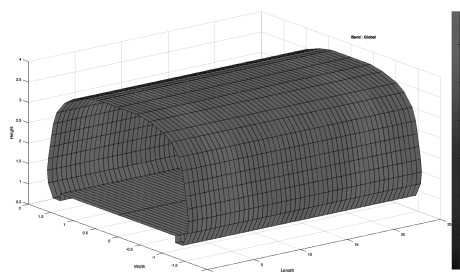


图8 隧道状态下车体表面声场仿真分析结果

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com