轨道车辆不锈钢车体激光焊接装配技术研究

马爱华
（中车青岛四方机车车辆股份有限公司 山东 青岛 266000）

摘要：文章介绍了轨道车辆激光焊接电永磁装配技术的研究过程，研究了磁场对激光焊接的影响。开展了不同辅助压块的对比试验，穿透不同厚度奥氏体不锈钢的夹紧力测试，并自主研发了电永磁装配系统，减小装配间隙对激光焊接质量的影响。

关键词：轨道车辆；电永磁；装配；激光焊接；研究

1 概述

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法，随着制造技术水平的不断提高，激光焊接在轨道交通行业应用范围不断扩大。在工程化应用过程中，影响激光焊接质量的因素包含激光光束质量、离焦量、焊接功率、焊接速度、装配间隙、保护气体流量等，其中工件装配间隙是稳定激光焊接质量的一个重要的外在因素。

不锈钢搭接激光焊缝的装配间隙超出 0.2mm 无法实现激光焊接。装配间隙在 0 ～ 0.2mm 之间可进行激光焊接，却存在焊接质量不稳定的隐患，焊缝易出现塌陷、断续焊缝及未融合现象。

传统的装配方式采用多点式压紧形式，焊接空间狭小，且在无压点的位置仍存在压紧效果不良的现象。为提高装配质量及装配效率，利用电永磁对工件的夹紧力消除工件之间的装配间隙，可保证工件之间密贴，使工件在焊接过程中一直处于约束状态，消除装配间隙对激光焊接质量的影响。

2 电永磁工作原理

利用不同永磁的不同特性，通过电控系统对内部磁路的分布进行控制与转换，使永磁磁场在系统内部自身平衡，对外表特征为消磁（DEMAG）即放松状态（见图 2）；或者释放到吸盘的工作表面，对外表特征为充磁（MAG）即夹紧状态（见图 1）。

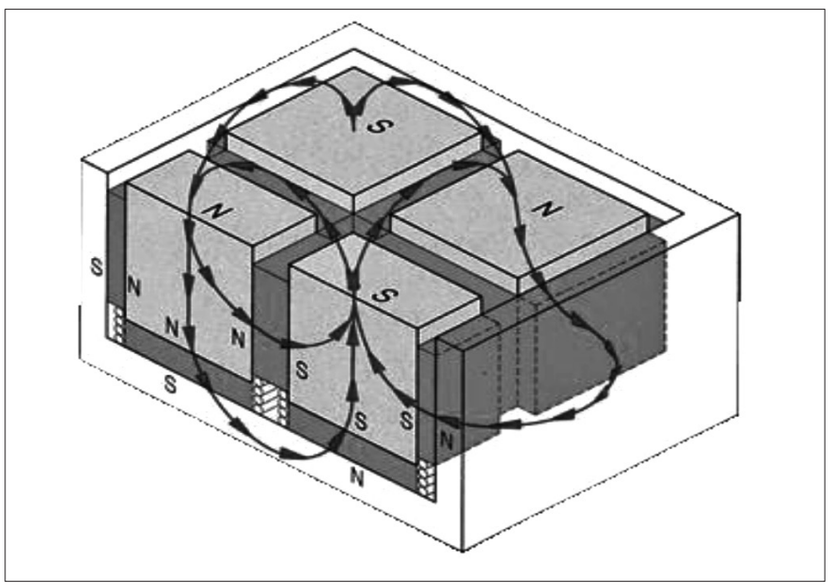


图 1 电永磁充磁磁力线分布

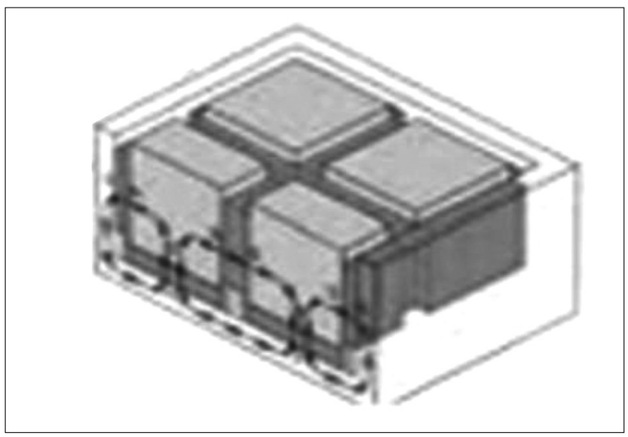


图 2 电永磁退磁磁力线分布

3 电永磁的优点

3.1 安全、强劲

电永磁系统在工作中不需要电能，只靠永磁吸力夹持工件，避免了电磁系统在突然断电和拖线损坏时磁力丧失而出现工件无夹紧力的可能。永磁的夹紧力非常强劲，可达 18kgf/cm^2，且恒定不变，更不随时间的延长而衰减，安全性好。

3.2 实用、高效

电永磁系统的使用方法非常简便、快捷，夹具系统内部没有运动部件，可靠耐用，且无须维修，实用性强。消磁与充磁的转换过程只需 1 ～ 2s，装夹与松开的效率非常高。工作中不需电能供给，夹具没有任何发热现象，避免了电磁系统带来的热变形，可提高零件的装配精度。

3.3 经济、环保

由于电永磁系统只在充磁和消磁的过程中使用电能，省去了传统机械、液压、

38-50 现代交通技术 8月中 第23期 .indd 38 2022/2/8 10:53:17

气压夹紧系统中的电、液、气路及蓄能器的配置，避免了油、气的泄露及夹紧螺栓的疲劳损伤，节省能源，经济环保。

4 电永磁装配技术研究

4.1 磁场对奥氏体不锈钢激光焊接的影响

试验用电永磁型号为 WIS60110-HD70，电控永磁吸盘穿透奥氏体不锈钢仍然存在磁力，但对于焊缝成形及外观无影响，宏观形貌与拉脱力与普通夹紧方式相同。

4.2 不同辅助压块对比试验

不同形式的辅助压块对夹紧力影响不同，通过不同板厚、不同接触面积的辅助磁性碳钢压板进行夹紧力试验，得出电永磁穿透不同厚度奥氏体不锈钢板材应采用厚度不小于 15mm，尽可能大的接触面积有较好的压紧效果。

表 1 穿透不同厚度奥氏体不锈钢的夹紧力

序号	穿透厚度 (mm)	夹紧力（kg）	备注
1	0.8-SUS301L-DLT	1112	
		1118	
		1124	
2	1.5-SUS301L-DLT	420	
		422	
		422	
3	2-EN1.4318+2G	230	
		234	
		236	
4	0.8-SUS301L-DLT+ 2-EN1.4318+2G	124	
		126	
		128	
5	1.5-SUS301L-DLT+ 2-EN1.4318+2G	78	
		78	
		78	
6	2-EN1.4318+2G+ 2-EN1.4318+2G	60	
		60	
		60	
7	2-EN1.4318+2G+ 3-SUS301L-ST	40	
		40	
		40	
8	4-SUS301L-ST+ 4-SUS301L-ST	0	
		0	
		0	

4.3 穿透不同厚度奥氏体不锈钢的夹紧力测试

采用的磁盘型号为 WIS506-HD70 为电永磁工装的标准模块，测试用压块尺寸为 150mm × 230mm，厚度为 12mm，覆盖磁盘 6 个磁极。穿透不同厚度的奥氏体不锈钢测试 3 次（夹紧力见表 1）。

通过穿透试验可知，奥氏体不锈钢对电永磁磁场的屏蔽作用随板厚增大而大幅减小，当板厚超过 8mm 时，奥氏体不锈钢基本将磁力线全部屏蔽。

结合现车产品板厚组合进行试验，与墙板（贴 PE 保护膜）搭接最大组合为 3mm+2mm，夹紧力可达到 40kg，最

表 4 宏观结果

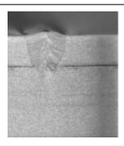
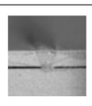
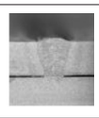
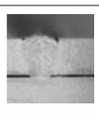
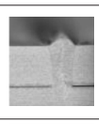
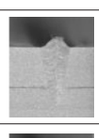
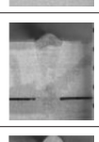
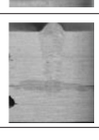
序号	板厚组合（mm）	试样编号	熔深（mm）	熔宽（mm）	宏观
1	0.8+2	DY1-31	0.5	0.6	
2	0.8+2	DY1-32	0.46	0.56	
3	1.5+2	DY2-31	0.5	0.8	
4	1.5+2	DY2-32	0.4	0.8	
5	2+2	DY3-31	0.8	1	
6	2+2	DY3-32	0.84	0.9	
7	3+2	DY4-31	0.96	0.76	
8	3+2	DY4-32	0.6	0.8	

表 2 试匝验椴材牧料匣化 C 成煞分郑（ %）

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	N
SUS301L-DLT	≤ 0.03	≤ 1	≤ 2	16 ~ 18	6 ~ 8	≤ 0.045	≤ 0.030	≤ 0.20
EN1.4318+2G	≤ 0.03	≤ 1	≤ 2	16.5 ~ 18.5	6 ~ 8	≤ 0.045	≤ 0.015	0.1 ~ 0.2

表 3 试验材料力学性能

材料	屈服强度 Rel/MPa	抗拉强度 RM/MPa	断后伸长率 A/%
SUS301L-DLT	≥ 345	≥ 690	≥ 40
EN1.4318+2G	370	650 ~ 850	45

38-50 现代交通技术 8月中 第23期 .indd 39　　2022/2/8 10:53:17

表 5 拉脱力结果

序号	板厚组合	试样编号	拉脱力（N）	备注
1	0.8+2	DY1-41	12929.7	
2	0.8+2	DY1-42	12742.2	
3	0.8+2	DY1-43	13054.7	
4	1.5+2	DY2-41	13351.6	
5	1.5+2	DY2-42	12578.1	
6	1.5+2	DY2-43	16125	
7	2+2	DY3-41	21046.9	
8	2+2	DY3-42	20976.6	
9	2+2	DY3-43	20898.4	
10	3+2	DY4-41	16601.6	
11	3+2	DY4-42	15929.7	
12	3+2	DY4-43	15820.3	

小组合为 0.8mm+2mm，夹紧力可达到 124kg，满足工件夹紧的需求。

4.4 试验材料、方法及过程

4.4.1 试验材料、设备

试验材料为现车使用的奥氏体不锈钢 SUS301L-DLT 和 EN1.4318+2G，化学成分及机械性能分别见表 2 和表 3。

试验所用设备最大额定功率 6kW 的 Trumpf 轴流式 CO2 激光器，激光焊接头焦距为 330mm，光斑直径为 0.5mm。

4.4.2 验证焊接工艺规范

因工件的夹紧形式发生变化，为验证是否对激光焊接产生影响，对激光焊接设备的焊接工艺规范进行验证，按照 15614-11 的标准重新制作了样件。板厚组合的熔深、熔宽及截面图件表 4，拉伸结果见表 5。

通过对焊接工艺规范的验证可知，采用电永磁装配工装进行的激光焊接接头强度满足设计要求，宏观容貌与普通压紧方式相似，拉脱力与普通压紧方式（见表 6）相当，可见电永磁技术可应用到薄板奥氏体不锈钢激光焊接中，进行单元级的激光焊接。

5 电永磁装备研发及样件制作

5.1 电永磁装备设计

电永磁磁盘是产生磁力的根源，作为基础模块布置在整个激光焊接区域。不同车型的外轮廓通过导磁垫的整体加工来实现，是电永磁工装的柔性切换部分，能够将磁盘的磁力有效传递出来（见图 3）。

（1）电永磁磁盘镶嵌在刚性框架上，采用螺栓活连接，方便拆卸。

表 6 原装配工艺的工艺评定结果

板厚组合（mm）	熔深（mm）	熔宽（mm）	拉脱力（kN）
0.8+2	0.4	0.4	20
1.5+2	0.4	0.7	20.57
2+2	0.4	0.7	19.7
3+2	0.4	0.4	15.8

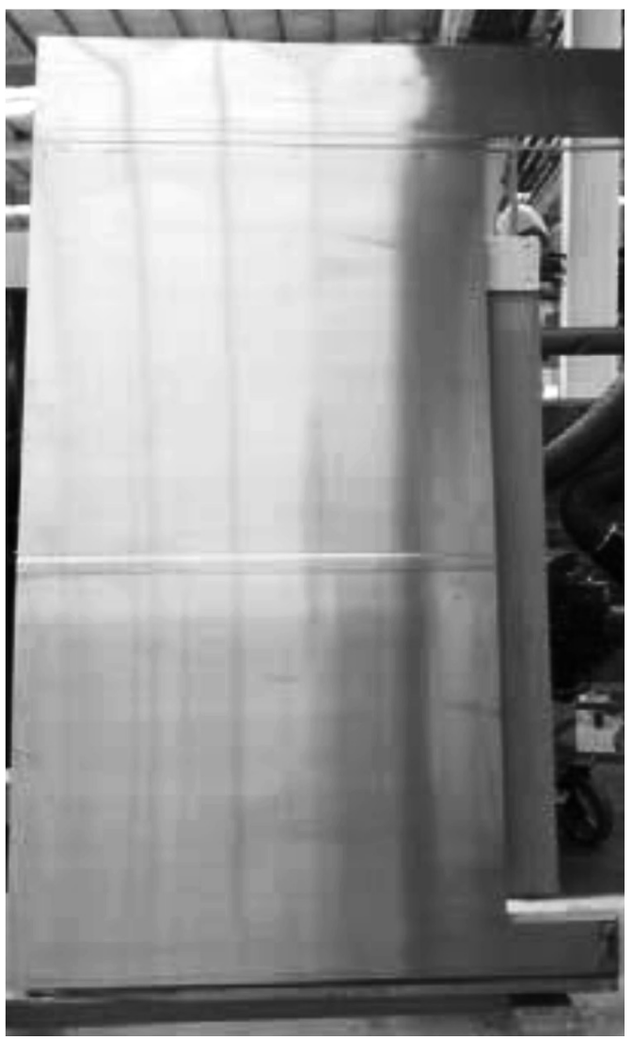


图 3 电永磁装备三维设计图

（2）磁盘表面上安装导磁垫，导磁垫厚度不小于 15mm，采用碳钢整体加工成侧墙单元的外轮廓后进行表面

38-50 现代交通技术 8月中 第23期 .indd 40 2022/2/8 10:53:18

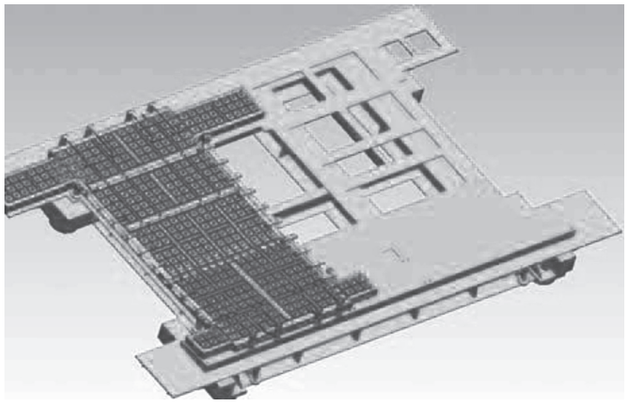


图 4 单元样件

镀铬处理。

（3）电永磁磁盘与下部框架之间通过调整块实现车型互换及角度调整，电永磁磁盘为通用部分，当侧墙单元外轮廓发生变化时只更换调整块即可实现。

（4）磁盘分块控制，控制面板按照侧墙单元磁盘进行定制，方便分块控制。

5.2 产品试制过程

在电永磁装配工装上进行单元样件焊接，所得实物见图 4。

6 结语

通过上述的试验可知，电永磁装配技术适用于奥氏体不锈钢薄板激光焊接。该施工方法满足激光焊接的相关要求，主要优点如下：

(1)约束可靠。在整个焊接过程中无盲区的全过程约束，在后续项目中可大力推广应用。

（2）工装柔性化水平高。通过简单调整导磁垫及调整垫块形状，可适用于不同断面的车型。

（3）工装自动化程度高。充磁与退磁通过电气自动分块控制。

（4）装配效率高。与原装配工艺比较，降低了工人的劳动强度，充磁与退磁即可实现工件的夹紧与放松。简化了工装结构及装配流程。

(5)焊接效率高。所有的焊接工步不再使用辅助压紧轮，提高了焊接效率。

（6）焊接空间大。焊枪焊接区域除吊架外无任何干涉。

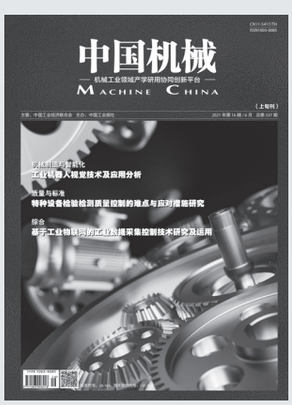
参考文献：

[1] 彭加耕 . 电永磁夹紧方法及其影响因素 [J]. 塑性工程学报 ,2011,18(2).

[2] 吕祎 . 电永磁技术在金属加工中的应用 [J]. 金属加工 (冷加工),2017(17).

[3] 唐淑勤 , 韩峰 , 郑凯 , 等 . 电磁吸附式激光焊接试验平台开发及应用 [J]. 焊接与切割 ,2018(12).

[4] 尚红梅 . 电永磁夹具 [J]. 金属加工 (冷加工)2010(16).

广告征订

版位 Format	价格 Price（RMB）
特殊版位 Specified Ads. Position	
封面	25,000
封二	16,000
封三	12,000
封底	18,000
扉一	15,000
扉二	10,000
后扉一	12,000
后扉二	9,000

版位 Format	价格 Price（RMB）
正常版位 Editorial Page	
编辑页	10,000
编辑页跨页	15,000
1/2编辑页	5,000
1/3编辑页	3,500
1/4编辑页	2,500

注：所有特殊版位广告均为4C广告，正常版位广告均为黑白色；所有广告需提供成熟设计稿，如需编辑部制作需单独收费。

优惠说明：
在原价格基础上，连续预定3期，优惠**8%**；连续预定6期，优惠**15%**；连续预定12期，优惠**20%**；连续预定18期，优惠**30%**；连续预定36期，优惠**40%**。另，如提前一次性付款，可在享受优惠的基础上享受**8%**的额外折扣。

广告预定热线：010-6741 0664 / 1368 332 6370

38-50 现代交通技术 8月中 第23期 .indd 41 2022/2/8 10:53:19