

不锈钢地铁车体底架边梁MAG焊接变形控制浅析

郭毅, 龚仙龙, 丁洁琼, 刘庭宾

中车南京浦镇车辆有限公司 江苏南京 210031

摘要: 不锈钢车体底架边梁通常采用钢板辊弯成形工艺, 为了加强边梁本身结构, 同时考虑与牵枕缓的装配结构, 底架边梁在枕梁周边区域通常采取补强板+封板的结构进行补强。不锈钢材料具有热导率低、线膨胀系数大的物理特性, 导致底架边梁在采用MAG焊接方法焊接补强板及封板时变形较大, 影响后工序底架组装。通过对底架边梁的结构焊接模拟仿真及焊接顺序优化进行分析, 为不锈钢地铁底架边梁焊接变形的控制提供参考。

关键词: 不锈钢地铁; 底架边梁; MAG焊接; 焊接变形

Analysis on deformation control of stainless steel subway car body bottom edge beams MAG welding

GUO Yi, GONG Xianlong, DING Jieqiong, LIU Tingbin

CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu, China

Abstract: The edge beams of the stainless steel car body frame are usually formed by steel plate roll bending technology. In order to strengthen the structure of the edge beams themselves and consider the assembly structure with traction sleepers, the bottom frame edge beams are usually reinforced by a structure of reinforcing plates and sealing plates in the surrounding area of the sleepers. Stainless steel material has the physical characteristics of low thermal conductivity and high coefficient of linear expansion, which leads to significant deformation of the bottom frame edge beam when welding reinforcement and sealing plates using MAG welding method, affecting the subsequent process of bottom frame assembly. This article analyzes the structural welding simulation and welding sequence optimization of the bottom frame edge beam, providing a reference method for controlling the welding deformation of stainless steel subway bottom frame edge beams.

Keywords: stainless steel subway; the edge beam; MAG welding; welding deformation

1 序言

随着经济的发展, 地铁交通系统以其便捷性、准时性、载客量大等优点在各大城市得到大力发展, 越来越多的地铁车辆被生产和使用。其中, 不锈钢材料因其具有良好的耐蚀性、轻量化、维护成本低及绿色环保等优点, 而被广泛应用于地铁车辆的生产制造。

由于不锈钢材料具有热导率低、电阻率高、线膨胀系数大等物理特性, 焊接后的变形量较大, 所以不锈钢材料通常采用电阻点焊、缝焊、TIG焊等焊接变形较小的焊接方法。如图1所示的底架边梁结构, 只能采用效率较高的MAG焊接方法, 但采用这种焊接方法会导致变形量较大。由于该变形区域后续与牵枕缓部件进行装配连接, 是车体结构的关

键位置，如果变形较大会导致底架边梁与牵枕缓的装配间隙较大，不能满足焊接工艺要求，并影响地铁车辆的限界尺寸等，严重影响到产品的质量。因此，针对底架边梁结构及组焊过程进行分析，制定出合理的反变形措施和优化焊接顺序来控制底架边梁焊接变形尤为重要。

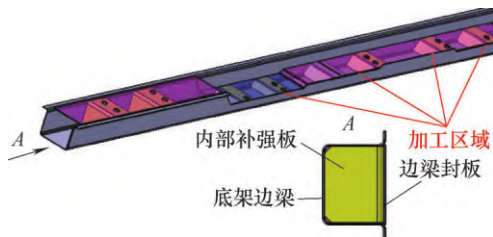


图1 底架边梁结构

2 底架边梁组焊工艺分析

2.1 底架边梁组焊工艺

底架边梁焊接密集区域主要集中在两端枕梁附件区域，底架边梁组焊工艺流程如图2所示。先组装及焊接内部补强板，打磨清理焊缝后再安装边梁封板，接着按照工艺要求完成边梁封板与内部补强板及底架边梁的焊接（见图3）。工装采用翻转变位工装，将所有焊缝转换为PB（或PA）位置进行焊接。

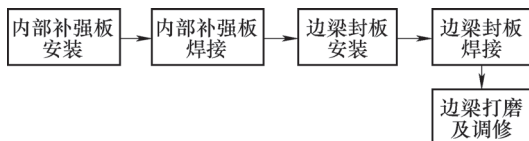
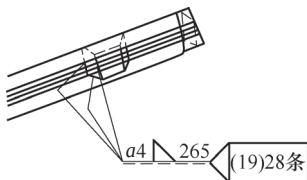
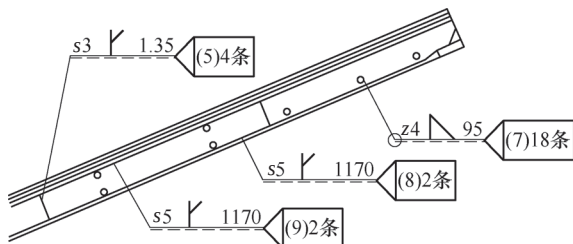


图2 底架边梁组焊工艺流程



a) 内部补强板与底架边梁焊接



b) 边梁封板与底架边梁、补强板焊接

图3 底架边梁焊接形式（焊接方法为135-MAG焊接）

2.2 底架边梁焊接变形现状

按照组焊工艺流程完成底架边梁内部补强板、边梁封板组焊后，利用3m平尺及150mm钢直尺对底架边梁外立面平面度进行检测，变形区域主要出现在两端牵枕缓接口区域，变形量约为55mm，如图4所示。

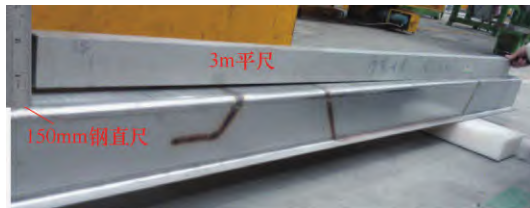


图4 底架边梁焊接变形示意

通过对底架边梁结构以及整个底架结构进行工艺分析，可以采取以下措施进行焊接变形控制^[1]。

- 1) 增加反变形措施，内部补强板及边梁封板均满焊接。
- 2) 增加反变形措施，优化边梁封板与底架边梁的焊接顺序。
- 3) 增加反变形措施，调整底架边梁加工工艺路线，将底架边梁加工由焊前加工调整为焊后加工。

3 工艺控制措施

3.1 模拟仿真计算

(1) 网格划分 底架边梁结构属于长大部件，关于Z轴方向对称^[2]。为了提高计算效率，采用模型一半及壳单元进行焊接变形仿真模拟计算^[3]。同时补全边梁加强筋、封板与边梁之间的焊缝，细化焊缝区域，最终获得底架边梁组焊件的网格模型。底架边梁模型局部网格划分如图5所示，网格总单元数为50330个，焊缝及热影响区网格最小尺寸约为2mm。

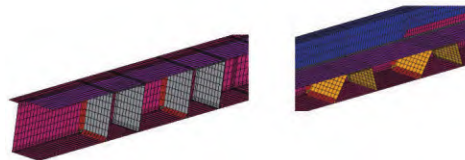


图5 底架边梁模型局部网格划分示意

(2) 材料属性 将底架边梁组焊涉及的零部件赋予材料属性，相关数据见表1。

(3) 载荷及约束 底架边梁组焊按照以下3种方案进行焊接变形仿真。

表1 材料属性

部件名称	材料	板厚/mm	杨氏模量/MPa	泊松比	线膨胀系数
底架边梁	SUS301L	4.5	200000	0.3	0.000017
内部补强板	SUS301L	3、4	200000	0.3	0.000017
边梁封板	SUS301L	4、5	200000	0.3	0.000017

1) 方案1: 底架边梁先加工后焊接; 内部补强板与底架边梁满焊; 边梁封板与底架边梁满焊。

2) 方案2: 底架边梁先加工后焊接; 内部补强板与底架边梁满焊; 边梁封板与底架边梁焊缝局部焊接(仅针对后工序由于遮挡或空间受限的位置进行焊接, 其余焊缝调整到后工序底架组装后再焊接)。

3) 方案3: 底架边梁先焊接后加工; 内部补强板与底架边梁满焊; 边梁封板与底架边梁满焊。

按照实际作业工装夹具约束工况, 分别对应夹具约束Y方向(下压、支撑)、横向Z方向、端部X方向自由度。焊接完毕释放所有夹具, 模型约束加载示意如图6所示。焊接顺序按工艺制定的从中间向两边的顺序进行焊接, 所有组件焊接完毕后, 松开所有夹具, 为了防止刚体位移, 约束边梁长度方向中部作为参考点, 获得焊后边梁焊接变形值。

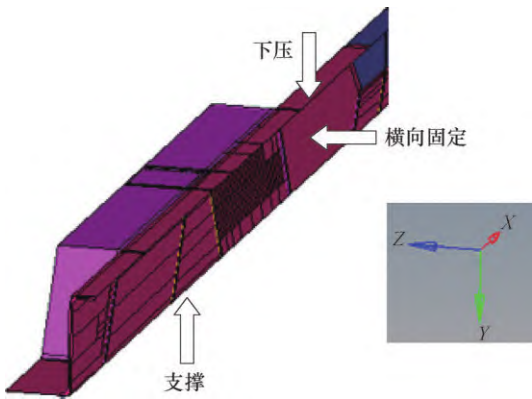


图6 模型约束加载示意

(4) 仿真结果 按照同样模拟条件, 对3种方案的底架边梁焊接变形进行了模拟仿真计算, 底架边梁焊接综合节点位移云图如图7所示。由图7可知, 各方向节点位移最大值发生位置及方向基本一致, 并将仿真模拟结果数值进行对比, 见表2。

3.2 工艺试验验证

由表2可看出, 方案1在工装上施加反变形后, 对焊接变形的减小不是非常明显; 方案3焊接变形最

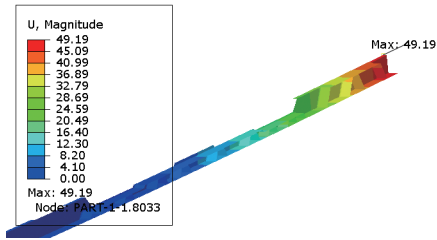


图7 底架边梁焊接综合节点位移云图

表2 模拟结果数值对比表 (mm)

方案	整体变形	X方向	Y方向	Z方向
方案1	49.19	2.59	49.12	0.44
方案2	28.84	1.48	28.8	0.22
方案3	1.02	0.38	0.96	0.19

小, 只有1mm左右; 方案2焊接变形次之, 但能有效减小焊接变形达45%。

考虑到生产节拍、制造难度以及后续的调修手段, 方案2最适合现场批量生产, 方案3增加了现场生产制造的难度及作业时间。因此, 再次针对方案2和方案3开展焊接变形工艺试验验证。

(1) 工艺试验条件

- 1) 操作人员涉及的冷作工及焊工为同一批人。
- 2) 焊机为同一台焊接设备。
- 3) 工装为同一套工装, 并在工装上施加反变形块, 枕梁位置反变形块厚度为20mm, 往枕外方向依次为15mm、10mm, 如图8所示。

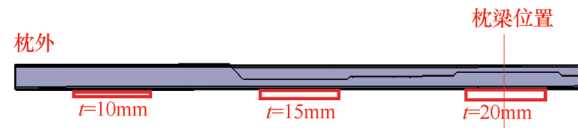


图8 底架边梁工装反变形设置示意

4) 底架边梁、内部补强板及边梁封板采用正式车物料。

5) 作业工步内容及焊接顺序保持一致。其中方案2边梁封板与底架边梁焊接区域如图9所示, 所有尺寸均以枕梁中心线为基准进行测量。方案3边梁封板与底架边梁连接区域进行满焊焊接。

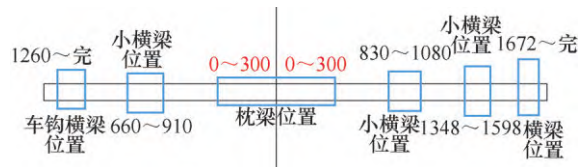


图9 方案2中边梁封板焊接区域示意

6) 调修采取机械调修方式, 先用平尺找出最高

的凸点，再使用重砣缓慢下压凸点位置的方式进行调修，如图10所示。



图10 底架边梁调修示意

(2) 工艺试验数据 按照工艺试验大纲完成方案2和方案3的焊接工艺试验，焊后测量的反变形数据见表3。

表3 方案2、方案3焊接变形数据分析 (mm)

方案	变形数据	
	调修前	调修后
方案2	15	7
方案3	5	3

通过对比方案2和方案3的焊接变形数据可看出，最终经过调修处理后变形量差别不大，且经过后道工序验证，底架边梁平面度控制在 $\leq 10\text{mm}/3\text{m}$ 的范围时均可接受。综合考虑零部件工艺路线、生

(上接第40页)

在埋弧焊盖面前，需将焊缝余高打磨处理匀顺。

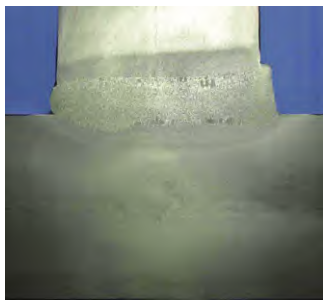


图8 宏观酸蚀金相检测照片

5 结束语

1) 通过焊接试验验证了采用窄间隙气电立焊进行H型钢厚板T形接头熔透焊接工艺的可行性，试验结果满足规范要求。

2) 将窄间隙气电立焊与开坡口双面人工气体保护焊进行对比，均在焊缝填平（不盖面）前提下，以板厚70mm的T形接头为例来说明。结果表明，窄间隙气电立焊焊接填充量约为开坡口焊接填充量的60%；人工气体保护焊焊接，在未计反面清根、层间清理、焊工休息等时间的情况下，窄间隙气电立

产节拍、制造难度等，优先选择方案2进行批量生产。

4 结束语

本文通过对不锈钢地铁车辆底架边梁组焊工艺过程进行分析，底架边梁焊接变形主要是由于内部补强板及边梁封板焊接时产生的变形。由于内部补强板处于封闭空间，只能针对边梁封板焊接及底架边梁加工工艺路线角度提出解决方案。通过模拟仿真技术和工艺试验验证手段对解决方案进行有效验证，两种方案均能有效减小底架边梁的焊接变形，提升了产品的质量，为解决类似不锈钢产品焊接变形提供了可参考的工艺方法。

参考文献:

- [1] 张兴品. 焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响分析及控制措施[J]. 中国设备工程, 2021 (5): 109-110.
- [2] 王宇, 卢玲. 基于Ansys的有限元网格划分方法应用研究[J]. 起重运输机械, 2014 (3): 53-56.
- [3] 周禄军, 李树栋, 周成候, 等. 不锈钢地铁车顶典型焊接接头有限元分析[J]. 电焊机, 2017, 10 (10): 80-85.

MW 20240305

焊焊接时间约为人工焊接时间的40%。因此，采取窄间隙气电立焊方法进行H型钢腹板与翼板T形全熔透焊缝焊接，可免去坡口加工工序，减小焊缝金属填充量，同时可节约焊接成本，大大提高生产效率。

3) 采用窄间隙气电立焊进行H型钢T形接头焊接也存在不足之处，比如在焊接前，需将构件竖向放置，并采用工装夹具将腹板和翼板固定，焊前准备工作量较大；因厂房高度限制，不适合较长构件的焊接；焊缝内部出现质量问题时，返修困难较大；批量化生产才能体现出其焊接优越性，因此需综合考虑其具体应用场景。

参考文献:

- [1] 陈雄雄. 建筑钢结构技术应用原则及质量控制要点[J]. 大众标准化, 2023 (11): 22-24.
- [2] 邓鹏, 明水峰, 孙吉华, 等. 建筑钢结构质量控制及关键工艺研究[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (6): 79-83.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊选手册: 焊接方法及设备[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.

MW 20240409