不规则大弧度的不锈钢波纹板缝焊工艺分析

曹兴华，刘庭宾，王红波
中车南京浦镇车辆有限公司　江苏南京　210031

摘要：近年来，不锈钢车体以其独有的优势受到用户青睐，不锈钢车体缝焊技术应用越来越广泛。针对不规则、大弧度的车体波纹板结构特点，对缝焊过程中的工艺难点进行了分析，设计了满足要求的缝焊定位工装及专用吊具，制定了合理的焊接参数，以及针对缝焊机结构特点，确定了合理的侧顶板与波纹板组焊顺序，最终确保不规则大弧度的不锈钢车体波纹板缝焊后的产品质量满足要求；同时，该焊接方法实现了对于不规则大弧度的圆弧形结构在轨道车辆上的缝焊应用，解决了不规则大弧度的圆弧形结构难于定位，缝焊过程中容易发生偏移，以及因焊缝接头多而需要进行大量焊接修补等问题，提高了产品缝焊稳定性及密封性，有效防止漏雨事故的发生，最终实现产品质量和生产效益的双提升。

关键词：不锈钢车体；不规则；大弧度；波纹板；缝焊

Analysis of seam welding process of stainless steel car body corrugated board

CAO Xinghua, LIU Tingbin, WANG Hongbo
CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu, China

Abstract: Recent years, the stainless steel car body has been favored by more users with its unique advantages. The seam welding technology application of stainless steel car body is more and more widely. According to structural characteristics of side roof plate and corrugated plate of the car body, the technical difficulties were analyzed during the seam welding process. The craft equipment and special spreader of side roof plate on seam welding were designed. The reasonable welding process parameters were formulated, and according to the structure characteristics of the seam welding equipment, the reasonable welding sequence of side top plate and corrugated plate were determined. In the end, the weld quality of the corrugated board of stainless steel car body is guaranteed to meet the requirements.

Keywords: stainless steel body; irregular; large curvature; corrugated board; seam welding

1　序言

随着中国经济的飞速发展，为了缓解交通压力，各大城市对于轨道车辆的需求逐年增加，而不锈钢车辆具有高强度、高耐蚀性、高安全性，以及全寿命周期成本低等优势，符合轨道车辆“绿色交通”的发展方向[1]。

目前，国内不锈钢车体生产大量采用电阻点焊及电阻缝焊，本文介绍的不锈钢车体波纹板缝焊具有生产效率高、成本低、节省焊接材料，以及易于实现自动化的优点，广泛应用于轨道车辆生产中，但其具有如下焊接难点。

1）在焊件上沿缝焊机滚轮电极行走的路径必须

没有障碍，而侧顶板与波纹板焊接时需要在其下方设置支撑平台，因此会导致电极行走路径上存在障碍。

2）缝焊机电极滚轮横向尺寸不能调节，会导致尺寸不合适的组焊工件无法进行焊接。

3）缝焊机包括连接第一电极的第一臂和连接第二电极的第二臂，第一电极和第二电极分别置于焊缝的两侧进行缝焊，因而第一臂、第二臂和缝焊机主体围成一个半封闭区，该区域空间狭小，容易与大尺寸不规则弧形结构的工件发生干涉，故轨道车辆行业大多将缝焊用于平面或近平面结构的焊接，采用缝焊对于轨道车辆的不规则大弧度波纹板的焊接仍难以应用[2-6]。

2　车顶波纹板结构介绍

图1所示为不规则大弧度的车体波纹板结构，是由2块侧顶板（见图1中A、B）和4块波纹板（见图1中C、D、E、F）组成。图2所示为车体波纹板断面，其中侧顶板板厚1.5mm、长度15780mm，波纹板板厚0.8mm，C、F波纹板长度为15780mm，D、E波纹板每块分为3段，长度分别为5205mm、3335mm、5205mm。侧顶板与波纹板材质均为X2CrNiN18-7钢，其化学成分见表1。

表1　X2CrNiN18-7钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.015	16.5～18.5	6～8	0.1～0.2

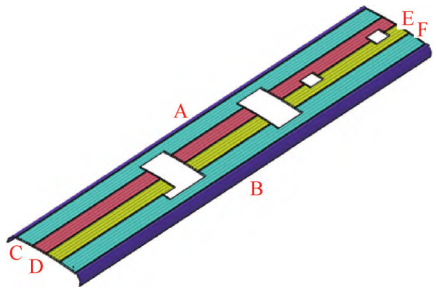


图1　不规则大弧度的车体波纹板示意

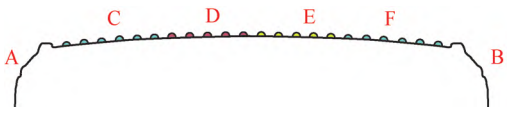


图2　车体波纹板断面示意

3　波纹板缝焊设备介绍

本文使用波纹板缝焊设备为日本株式会社电元社制作所生产，缝焊机设备型号为UICS-280-13（见图3），缝焊设备主要参数见表2，缝焊平台如图4所示，本文所述侧顶板定位工装即固定在此平台上。缝焊机内部空间较小，且电极轮在横向及纵向均不可移动，故下文所述波纹板缝焊时只能按照唯一顺序进行组焊。

图3　波纹板缝焊机

表2　波纹板缝焊机主要参数

定位精度/mm	纵向行程/m	工作台宽度/m	工作台高度/m	纵向最大速度/（m/min）	最大电极压力/kN
±0.1	30	2.5	1.2	20	12
最大板厚/mm	**最小板厚/mm**	**焊接最大速度/（m/min）**	**电极焊接行程/mm**	**电极作业行程/mm**	**连续工作时间/h**
2+2	0.6+0.6	5	70	100	16

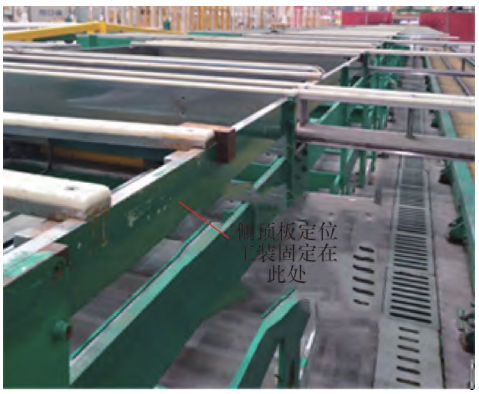


图4　波纹板缝焊平台

4　波纹板缝焊工艺难点

（1）工装定位要求高　如图5所示，由于侧

顶板为不规则大弧度的圆弧面，且受缝焊机结构限制，对侧顶板下部进行夹紧定位会妨碍机器行进，只能对侧顶板上部进行定位及夹紧，故定位工装精度要求较高，否则波纹板焊接过程中容易发生偏移现象。

图5　侧顶板轮廓示意

（2）缝焊机空间狭小妨碍工件焊接　由于缝焊机电极轮横向及纵向均不可移动，且受机器内部空间限制，因此波纹板组焊必须按照唯一特定顺序进行焊接，否则会因与机器发生干涉而无法焊接。

（3）板厚轻量化增加焊接工艺难度　该车辆项目整车做轻量化处理，波纹板厚度仅为0.8mm，焊接接头包括0.8mm＋0.8mm及0.8mm＋1.5mm两种，板厚较薄给焊接工艺制定增加了很大难度。

（4）需制作专用吊具　受缝焊机结构限制，以及根据侧顶板结构特点，侧顶板与波纹板焊接后掉头工步，以及波纹板焊后的整体吊运工步，需制作专用吊具。

（5）需制作专用缝焊定位工装　焊接侧顶板时，由于存在待焊工件支撑平台易与行走中的缝焊机发生干涉的问题，影响缝焊进行，因此需设计专用的缝焊工装进行焊接。

5　波纹板缝焊工艺措施

5.1　定位工装改进

根据侧顶板断面结构，由于缝焊机结构限制，图6所示绿色区域是能够进行夹紧定位区域，红色区域不具备夹紧及定位条件，否则会妨碍机器行进，故在定位条件有限的状态下，波纹板缝焊的工装定位精度要求较高，定位工装必须进行如下改进。

1）改进前定位工装使用铝合金材质，每组定位工装将两块铝合金切割样板通过螺栓固定，有一定误差；改进后工装采用尼龙材质整体加工而成，精度高，且不易划伤不锈钢表面。

2）改进前定位工装下部采用的固定螺栓较小，生产时由于焊接应力，6组定位工装位置会发生变化，导致波纹板在缝焊过程中发生偏移；改进后加大工装底部固定螺栓（见图7），增强定位能力，在缝焊过程中确保工装无偏移。

3）图8所示为改进后侧顶板定位工装共6件，焊前需严格对定位工装直线度及高度差进行检测，保证6件工装的直线度≤0.5mm，高度差≤0.5mm。

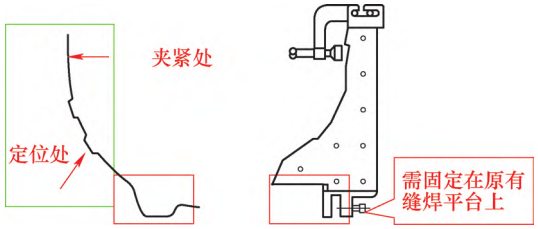
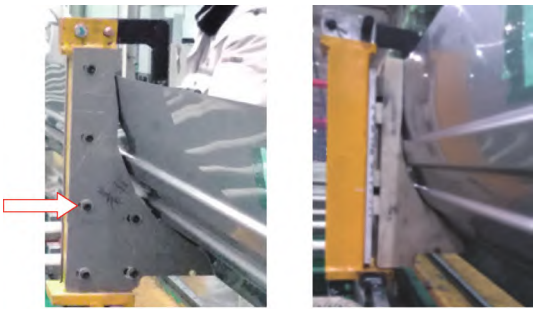
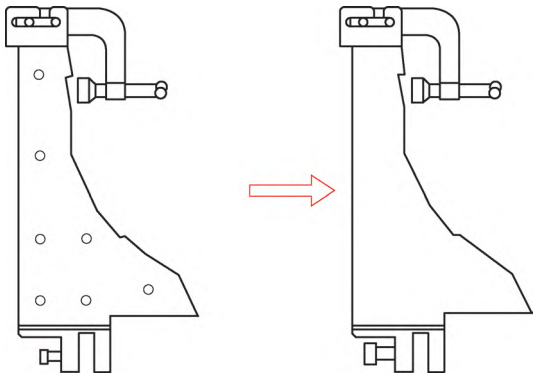


图6　定位工装示意



a）改进前　　b）改进后

图7　加大工装底部固定螺栓



a）改进前　　b）改进后

图8　侧顶板定位工装

5.2　工艺流程

对4块波纹板C、D、E、F按照分段进行编号，如图9所示。受缝焊机结构影响，制定波纹板缝焊工艺流程如下。

1）步骤一：需要先进行一位侧侧顶板与波纹板①进行焊接，具体流程和细节要求：第一，从中间分别向一位端、二位端进行电阻点焊，间隔0.5m；第二，由于缝焊方向是从二位端向一位端方向焊接，因此为避免焊接到一位端位置焊接应力过大，需对一位端端头位置提前进行段焊，以防止缝焊时开裂；第三，从二位端向一位端进行缝焊；第四，使用侧顶板专用吊具掉头，将其吊到存放架上，等待下一个工序使用。图10所示为侧顶板与波纹板焊接，图11所示为一位侧侧顶板与波纹板①的缝焊。从图10、图11可见缝焊机、缝焊工件、工装定位块相对位置及工作状态。

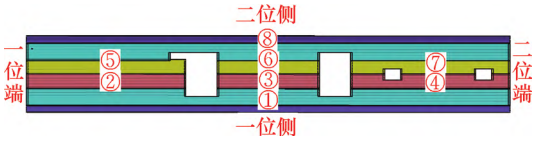


图9　波纹板缝焊示意（反装状态）

图10　侧顶板与波纹板焊接

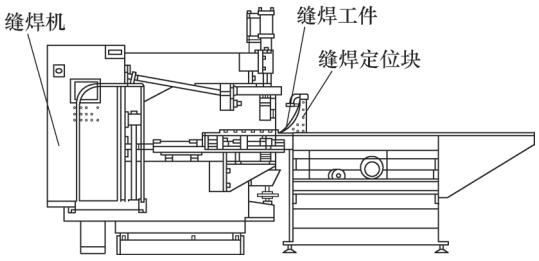


图11　一位侧侧顶板与波纹板①缝焊示意

2）步骤二：进行二位侧侧顶板与波纹板⑧焊接，先进行电阻点焊，一位端端头进行段焊，最后进行缝焊，具体按步骤一执行，注意焊后无需掉头操作。

3）步骤三：在步骤二焊后的波纹板上，依次组装波纹板⑤～⑦，组装时对好波纹板上缺口位置，按照步骤一进行电阻点焊及缝焊。

4）步骤四：组装波纹板②～④，并按照步骤一进行波纹板②～④电阻点焊及缝焊。

5）步骤五：将步骤一中焊后一位侧侧顶板与波纹板①吊运至胎位上，将其放入缝焊机空当内（见图12），与已焊接的波纹板进行组装，进行最后一道通长焊缝焊接，焊后波纹板实物如图13所示。

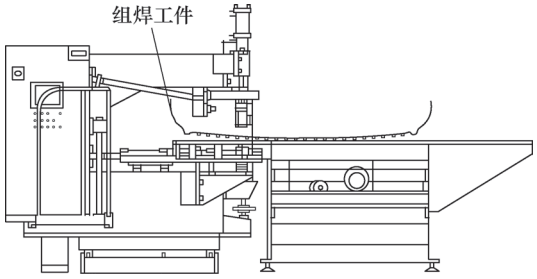


图12　波纹板整体缝焊示意

图13　焊后波纹板实物

5.3　焊接参数设定

由于该车辆项目整车做轻量化处理，波纹板厚度仅为0.8mm，因此给焊接工艺制定增加了很大难度。经过多次焊接工艺试验及工艺验证，最终得出满足设计需求的焊接参数，具体见表3。

表3　缝焊焊接参数

序号	焊接方法	板厚组合/mm	电极压力/kN	焊接电流/kA	通电时间/ms	焊接速度/(m/min)
1	22	0.8＋0.8	6	12	150	1.2
2	22	0.8＋1.5	6	12	150	1.2

5.4　吊具设计

由于整张波纹板焊后长度较长，且为不规则结构（见图13），直接吊运工件会发生较大变形，甚至损坏工件，故均需设计专用吊具进行吊运。

吊具主要分为以下3种使用情况。

1）焊前侧顶板的上胎吊运。

2）一位侧侧顶板与波纹板焊接件的掉头。

3）焊后整块波纹板的吊运。

专用吊具结构如图14所示，吊具通过吊具夹头（见图15）夹紧侧顶板，进行掉头或者吊运操作。该吊具夹头与侧顶板弧度严密贴合，且与侧顶板接触处均进行塑化处理，不会对侧顶板产生划痕，吊运后侧顶板无压痕及变形。

图14　专用吊具结构

图15　侧顶板吊具夹头

5.5　波纹板缝焊工装设计

为了解决在焊接侧顶板与波纹板时，由于待焊工件支撑平台易与行走中的缝焊机发生干涉的问题，所以设计了一套波纹板缝焊工装（见图16）。该工装上设置有感应伸缩臂（见图17），与工装本体配合支撑待焊工件，感应伸缩臂包括用于驱动伸缩臂伸缩的驱动装置，驱动装置连接有用于感应伸缩臂与缝焊机距离的距离感应装置，驱动装置根据接收到的距离感应装置传递的距离信息来控制伸缩臂伸缩。当缝焊机靠近伸缩臂时，感应伸缩臂回缩，缝焊机顺利通过。

如图16、图17所示，在工装本体上设置滑槽，感应伸缩臂可以沿滑槽伸缩，伸缩方向为工装本体的宽度方向，若干感应伸缩臂沿工装本体长度方向设置。滑槽内设置驱动伸缩臂伸缩的气缸，气缸的伸缩端固定连接伸缩臂，驱动伸缩臂沿滑槽伸缩。同时，在伸缩臂上设置有光电传感器进行距离感知，该光电传感器可采集伸缩臂与缝焊机的距离信息，当缝焊机与伸缩臂的距离达到设定距离时，伸缩臂回缩，当离开伸缩臂后控制伸缩臂伸出，这样就不会因底部支撑待焊工件的支撑架而妨碍缝焊机电极的焊接。

本工装共设置8套感应伸缩臂。常规状态下，这8套伸缩臂均呈伸出状态支撑工件。在焊接过程中，当缝焊机移动靠近某一伸缩臂时，该伸缩臂的距离感应装置启动该伸缩臂呈收缩状态，待缝焊机向前移动离开后，该伸缩臂呈伸出状态支撑工件，以此交替进行，完成工件缝焊。

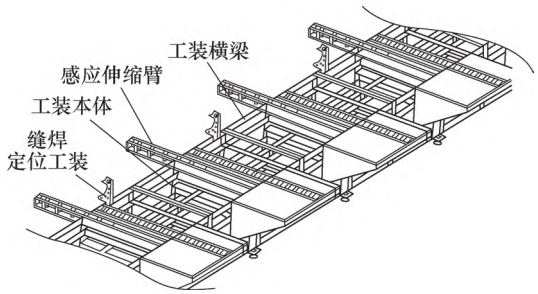


图16　波纹板缝焊工装设计示意

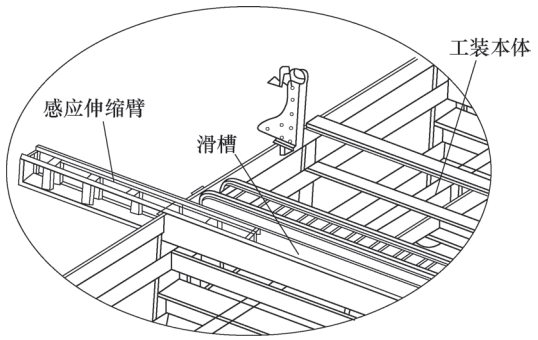


图17　感应伸缩臂细节

6　结束语

本文通过综合分析不规则大弧度侧顶板及波纹板的结构特点，针对侧顶板及波纹板结构复杂、定位精度要求高，以及焊后吊运易变形等工艺难点，在受到缝焊机结构及尺寸限制情况下，最终设计了满足要求的侧顶板及波纹板专用缝焊工装及专用

（下转第45页）

2024，44（3）：115-122.
[2] 曾过生，石雪飞. 扩建桥梁不中断交通拼接时机及管制措施研究[J]. 公路，2023，68（8）：179-184.
[3] 魏祎，张太科，阮欣，等. 混合交通流作用下大跨径桥梁车辆荷载效应分析[J]. 同济大学学报（自然科学版），2023，51（12）：1859-1867.
[4] 陈梦成，方苇，杨超，等. 钢结构中疲劳裂纹增长概率模型和Bayesian动态预测[J]. 铁道学报，2021，43（7）：177-184.
[5] 陈悦，潘学豪，邓淋方. 考虑残余应力影响的典型钢结构对接焊缝缺陷定位研究[J]. 建筑钢结构进展，2024，26（4）：112-120.
[6] 周建庭，夏润川，张洪. 桥梁内部钢结构病害检测研究与应用[J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2021，40（10）：20-28.
[7] 彭森，何连海，马志华，等. 钢结构桥梁对接焊缝缺陷的TOFD检测图像特征[J]. 无损检测，2021，43（12）：49-53.
[8] 王玲，杨建平，郭小华. 里氏硬度无损检测钢材牌号的试验[J]. 工业建筑，2022，52（12）：195-199.
[9] 杨忠华，付泽宇，付海霞. 泵塔区钢结构焊缝表面缺陷的超声红外热成像检测[J]. 无损检测，2021，43（11）：53-57.
[10] 宋飞，殷晨波，杜雪雪，等. 基于红外热成像检测技术的焊接裂纹深度定量识别研究[J]. 热加工工艺，2023，52（19）：128-132，138.
[11] 肖奇，冯健，汪刚，等. 基于多频平衡电磁技术的管道内外缺陷检测与全角度表面裂纹识别方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43（14）：5703-5713.
[12] 王传钊，姜秀海，晁永生，等. 基于涡流脉冲热成像的角焊缝表面裂纹检测[J]. 激光与红外，2022，52（10）：1498-1505.
[13] 冯沐祺，徐启明，战宇，等. 基于激光超声的轨道钢表面裂纹双侧扫描检测[J]. 中国激光，2024，05（14）：1-19.
[14] 郝柏桥，范玉刚，宋执环. 基于深度迁移学习的脉冲涡流热成像裂纹缺陷检测[J]. 光学学报，2023，43（4）：146-154.
[15] SHI L，ZU H，TAI J，et al. A welding defect detection model based on a shape-aware network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems：Applications in Engineering and Technology，2022，43（5）：6147-6162.
[16] 毛科技，汪敏豪，陈立建，等. 结合目标检测与匹配修正的手腕骨兴趣区域提取[J]. 中国图象图形学报，2022，27（3）：973-987.
[17] 刘凤，刘浩哲，张文天，等. 一种鲁棒的基于对抗结构的生物特征ROI提取方法[J]. 自动化学报，2023，49（6）：1339-1353.
[18] 赵雪山，段珍珍，周广浩，等. 不锈钢激光焊接头超声导波检测与质量评价技术[J]. 电焊机，2024，54（5）：142-147，159.
[19] 仇静博，燕雪峰，汪俊，等. 基于全卷积神经网络的单幅隧道图像裂纹提取算法[J]. 计算机工程与科学，2022，44（5）：845-854.
[20] 于微波，周旺，杨宏韬. 基于DSnet网络的零件边缘轮廓提取[J]. 组合机床与自动化加工技术，2023（2）：169-173，177.

（收稿日期：20250209）

（上接第38页）

吊具。同时，制定了合理的组焊顺序及缝焊焊接参数，确保了该项目不锈钢车体波纹板缝焊质量满足要求，保证了该项目地铁车辆的正常交付节点，得到了业主的好评，实现了产品质量和生产效益的双提升。

参考文献：

[1] 郭毅，龚仙龙，丁洁琼，等. 不锈钢地铁车体底架边梁MAG焊接变形控制浅析[J]. 金属加工（热加工），2024（7）：41-44.
[2] 程典阳，韩晓辉. 轨道车辆不锈钢波纹板自动焊缝工艺开发[J]. 电焊机，2008（6）：62-64.
[3] 陈锋，徐国梁. 地铁不锈钢车体研究[J]. 铁道车辆，2007（3）：28-30.
[4] 丁成钢，史春元，都本刚，等. SUS301L不锈钢电阻点焊工艺研究[J]. 热加工工艺，2006（11）：28-29.
[5] 姚明哲，杨志勇，马秋红，等. 不锈钢轨道车辆的特点[J]. 装备机械，2015（3）：15-17.
[6] 朱志民. 香港轻轨不锈钢车体焊接工艺[J]. 金属加工（热加工），2011（6）：22-24.

（收稿日期：20250116）