DOI: 10.3901/JME.2019.24.057

焊接顺序对横向止挡焊接残余应力及变形的影响*

刘阳^{1,2} 姜斌^{1,2} 王卉子¹ 安博^{1,2} 杨鑫华³

- (1. 中车唐山机车车辆有限公司 唐山 064000;
2. 河北省轨道车辆转向架技术创新中心 唐山 063035;
3. 大连交通大学材料科学与工程学院 大连 116021)

摘要: 采用数值模拟及试验手段相结合的方式研究焊接顺序对横向焊接止挡焊接残余应力及焊接变形情况的影响。基于 Sysweld 软件平台, 对横向止挡焊接温度场及应力应变情况进行计算, 并设置两种定位焊顺序及两种组焊顺序, 通过排列组合方式得出四种焊接方案。通过数值模拟及试验对比发现, 对于应力情况, 定位焊接顺序对焊接残余应力的分布影响很小, 而组焊的焊接顺序对横向止挡最大残余应力的影响起主要作用。从变形情况来看, 横向止挡 X 、 Z 方向的变形量最大, 变形量 1.2 mm 左右, 横向止挡 Y 方向的变形最小, 变形量 0.5 mm 左右。采用方案四的焊接方法能够有效控制焊接残余应力及焊接变形。

关键词: 焊接顺序; 横向止挡; 残余应力; 焊接变形

中图分类号: TG404

Influence of Welding Sequence on Welding Residual Stress and Deformation of Lateral Stop

LIU Yang^{1,2} JIANG Bin^{1,2} WANG Huizi¹ AN Bo^{1,2} YANG Xinhua³

- (1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000;
2. Hebei Railway Vehicle Bogie Technology Innovation Center, Tangshan 063035;
3. College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021)

Abstract: The influence of welding sequence on residual stress and welding deformation of welding of lateral stop were studied by numerical simulation and experiment. Based on Sysweld software platform, the temperature field and stress and strain of lateral stop welding are calculated. Set up two kinds of positioning welding sequence and two kinds of assembling welding sequence, and get four kinds of welding schemes by means of arrangement and combination. Through numerical simulation and experimental comparison, it is found that for the stress situation, the positioning welding sequence has little influence on the distribution of welding residual stress, while the welding sequence of assembly welding plays a major role in the influence of the maximum residual stress of lateral stop. In terms of deformation, the lateral stop in the X and Z direction has the largest deformation amount, about 1.2 mm, while the lateral stop in the Y direction has the smallest deformation amount, about 0.5 mm. The welding method of scheme 4 can effectively control the welding residual stress and welding deformation.

Key words: welding sequence; lateral stop; residual stress; welding deformation

0 前言

横向止挡主要功能是限制机车通过曲线时车体的横向位移^[1]。止挡结构对机车车辆的动力学性能有着至关重要的影响, 在现代机车车辆的设计与研

制过程中, 横向止挡的作用越来越被引起关注^[2]。由于横向止挡提供了一个较大的刚度, 止挡结构可以有效地抑制车体横向运动位移, 并且可以吸收车体对转向架造成的冲击, 因此, 横向止挡对列车的舒适度影响十分明显^[3]。

由于横向止挡在焊接时焊缝填充量大, 热输入多, 不可避免的会产生焊接残余应力与变形。此前已有学者对横向止挡对列车运行性能进行了研究, 如刘建新等^[4]研究了横向止挡结构参数对行车舒适

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200403)。20190830 收到初稿, 20191115 收到修改稿

性和安全性指标的影响;衣晨阳^[5]对动车组横向止挡橡胶减震器在不同使用温度下的静态特性进行了分析与预测;纪天成^[6]计算了横向止挡参数对车钩摆角、车体横向位移等方面的影响,祁建伟等^[7]研究了不同焊接参数与不规则坡口形式对焊接性能的影响、KEIVANI 等^[8]运用有限元法研究了焊接顺序对 T 型接头残余应力和变形的影响。以动车组横向止挡为研究对象,通过有限元数值模拟与试验等方法,研究了定位焊接顺序和组焊焊接顺序对动车组横向止挡焊接残余应力及变形分布的影响。

1 试验过程及方法

横向止挡由上盖板、下盖板、长立板、短立板(包括齿轮箱侧短立板及止挡座短立板)、两侧安装座(包括弹簧安装座及弹簧安装板)、横板、弹簧安装板筋板、横向减振器座组成,具体结构如图 1 所示。由于横向减震器座及弹簧安装板筋板焊接对整体变形影响较小,因此只对主要焊缝进行介绍及研究。

图 1 横向止挡结构

试验设置两种定位焊顺序及两种组焊顺序,按照排列组合方式,设定四种研究方案,分别进行焊接残余应力及焊接变形的仿真研究。现对两种定位焊顺序及组焊顺序进行说明。

定位焊顺序 a: 弹簧安装座及弹簧安装板与长立板固定→横板与长短立板、短立板与长立板→长、短立板与下盖板→长、短立板与上盖板。

定位焊顺序 b: 横向止挡下盖板与长、短立板→横向止挡短立板与长立板→横板与长、短立板→长短立板与上盖板→弹簧安装座及弹簧安装板与长短立板固定。

横向止挡的组焊分为内腔焊接与外腔焊接两部分,定义长、短立板内表面焊缝为内腔焊缝,内、外立板外表面焊缝为外腔焊缝。组焊顺序 a 与组焊顺序 b 均为先焊接内腔焊缝,再焊接外腔焊缝。

组焊顺序 a 如下。

内腔: 下盖板与立板焊缝→长、短立板焊接→横板与立板焊缝→上盖板与安装座→安装座与立板

→上盖板与立板。

外腔: 安装座与上盖板→下盖板与立板→立板与上盖板→长、短立板之间焊缝。

组焊顺序 b 如下。

内腔: 下盖板与立板→长、短立板焊接→横板与立板→上盖板与立板→上盖板与安装座→安装座与立板。

外腔: 安装座与立板→下盖板与立板→长、短立板焊接→立板与上盖板。

两种组焊方法的区别在于: 内腔焊接时, 组焊顺序 b 是先焊接上盖板与立板之间焊缝, 组焊顺序 a 是在焊接完安装座与立板及上盖板后再焊接上盖板与立板之间焊缝; 外腔焊接时, 组焊顺序 a 是先焊立板与上盖板, 而组焊顺序 b 是先焊接长、短立板后再焊接立板与上盖板。

根据以上两种定位焊顺序、两种组焊顺序设定四种仿真模拟方案, 具体方案如下。

方案一: 组焊顺序 a、定位焊顺序 a。

方案二: 组焊顺序 a、定位焊顺序 b。

方案三: 组焊顺序 b、定位焊顺序 a。

方案四: 组焊顺序 b、定位焊顺序 b。

为了保证横向止挡焊接时的结构静定性, 根据六点定位原则^[9], 对横向止挡施加内腔约束和外腔约束两部分。横向止挡的内腔约束位置在横向止挡座长立板中部、两端弹簧安装板和弹簧安装座处, 如图 2 所示。外腔焊接时, 约束主要作用到上、下盖板处, 具体压卡位置如图 3 所示。通过约束位置的协同作用, 实现对内、外腔焊接的定位和拘束。

图 2 横向止挡内腔约束

图 3 横向止挡外腔约束

横向止挡的焊接采用多层多道焊接, 接头坡口形式为单面 V 型坡口, 角度为 45° , 钝边为 2 mm。

母材为 Q345 低碳合金钢, 利用直读光谱仪获得母材及焊丝化学成分如下表 1 所示^[10], 母材及焊丝力学性能如表 2 所示。焊缝形式均为 HY 焊缝, 焊接顺序如图 4 所示, 其中 1 层为打底焊, 2、3 层为填充焊, 4、5、6 层为盖面层焊接。焊接方法采用 MAG 焊, 焊接材料选用与母材相匹配的 ER50-3 型实心焊丝, 焊接保护气为 82%Ar+18%CO₂, 采用机械手自动化焊接。自动化焊接工艺参数如表 3 所示^[11]。

图 4 横向止挡焊缝焊接顺序

表 1 Q345 及焊丝化学成分表(质量分数) %

材料	C	Si	Mn	S	P
Q345	0.16	0.39	1.43	0.008	0.016
ER50-3	0.073	0.88	1.49	0.011	0.01
材料	Ni	Gr	Gu	Al	Fe
Q345	0.01	0.031	0.01	0.02	余量
ER50-3	—	—	—	—	余量

表 2 Q345 及焊丝的力学性能表

材料	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	冲击吸收能量 (-40 °C)K _{v2} /J	断后伸长 率 ψ (%)
标准	≥335	470~630	≥34	≥22
Q345	400	530	44	29
ER50-3	460	565	88	30

表 3 自动化焊接工艺参数表

焊层	电流强度/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ (mm/s)	热输入效率 η
打底	220~260	22~30	6~8	0.8
填充	260~300	24~32	5~7	0.8
盖面	280~320	25~36	6~8	0.8

2 有限元模型

2.1 有限元模型建立

横向止挡座模型整体选用 8 节点实体单元, 温度计算时单元类型为 DC3D8, 应力计算时单元类型为 C3D8I^[12]。根据温度梯度变化情况采取过渡性网格设置。在模型中共建实体单元 111 027 个、131 384 个节点以及 32 991 个表面散热单元。网格模型如图 5 所示。

图 5 横向止挡有限元模型

2.2 热源模型及温度场计算

横向止挡的焊接方法为 MAG 焊, 温度场计算时, 采用 GOLDDAK^[13]提出的双椭球热源模型。该热源模型充分体现了焊接过程中热源前端温度变化快而后端温度变化慢的特点, 对电弧焊的焊接热源模拟较为准确^[14]。前后椭球的热分布函数分别为

$$\begin{cases} Q(c, y, z, t) = f_f Q \exp \left[-\left(\frac{x-vt}{a_f^2} \right)^2 + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right] \\ Q(x, y, z, t) = f_r Q \exp \left[-\left(\frac{x-vt}{a_r^2} \right)^2 + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right] \end{cases}$$

式中, $Q(x, y, z, t)$ 为时间 t 在 (x, y, z) 位置的热流量; f_f 、 f_r 分别为前、后两个椭球的能量输入; v 为焊接速度; a_f 、 a_r 、 b 、 c 为高斯参数; a_f 、 a_r 分别为前、后半部分椭球的长度; b 为熔宽; c 为熔深。

由于焊接的热分析过程是一个典型的非线性瞬态过程, 因此可用非线性传热方程来描述^[15]

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

式中, ρ 为材料的密度(g/mm³); c 为材料的比热容(J/g·°C); q_v 为内部热源发热率(W/mm³); ∇ 为空间梯度拉普拉斯算子。考虑模型与外部环境的对流与辐射, 通过完全牛顿法来描述模型与外部空气的对流散热

$$q_c = -h_c (T_s - T_0)$$

式中, q_c 为对流散热量, h_c 为对流散热系数, 取 q_c 为 3.3×10^5 W/(mm²·°C); T_s 为模型表面的温度; T_0 为外部环境温度, 设定为 20 °C。对于辐射问题, 采用 Stefan-Boltzmann 定律^[16]来定义

$$q_r = -\varepsilon \sigma \{ (T_s + 273)^4 - (T_0 + 273)^4 \}$$

式中, ε 为热辐射率, 计算过程中也取定值 0.8; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; q_r 表示为热辐射损失量。

2.3 应力应变计算

在应力场计算过程中, 采用了与热分析时相同的网格, 将温度场计算结果作为热载荷加载到热-弹-塑性有限元模型中进行应力和应变计算。对于焊接残余应力计算可以采用以下公式^[17]

$$\sigma_1 = \frac{E}{4A}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - \frac{\sqrt{2}E}{4B}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{4A}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{\sqrt{2}E}{4B}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

式中, $\sigma_{1,2}$ 为纵向、横向残余应力; E 为弹性模量; A 、 B 为应变释放系数; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为释放的应变; θ 为 σ_1 与最大主应力之间的夹角。应变释放系数与材料的弹性模量、泊松比等参数有关, 根据应变释放系数的标定, 取 A 为 $-0.039\ 52$, B 为 $-0.090\ 38$ 。

对于低碳合金钢的焊接固态相变对应力与变形的影响不明显或者完全没有影响, 因此计算时不考虑相变应变的影响。同时, 焊接是短时间的加热和冷却过程, 在高温停留时间较短, 可忽略蠕变应变的影响。忽略相变应变和蠕变应变成分后, 材料的总应变增量包含弹性应变、热应变、塑性应变^[18]。总应变增量可以表示如下

$$\Delta\varepsilon_{total} = \Delta\varepsilon^e + \Delta\varepsilon^{th} + \Delta\varepsilon^{pc}$$

式中, $\Delta\varepsilon^e$ 弹性应变增量, $\Delta\varepsilon^{th}$ 为热应变增量, $\Delta\varepsilon^{pc}$ 为塑性应变增量。计算时, 弹性行为遵守各向同性 Hooke 定律, 屈服准则服从 Von Mises 准则^[19]。由于低合金钢的加工硬化倾向不明显, 采用理想弹塑性模型, 计算中采用各向同性硬化准则考虑加工硬化。

3 结果与讨论

3.1 整体焊接残余应力情况分析

四种仿真方案分别经过 2 000 s 冷却和约束释放 0.2 s 后, 最终得到的焊接残余应力的分布。其 Von-Mises 应力分布情况如图 6 所示。其中, 方案一残余应力最大值为 510.111 MPa, 位于上盖板焊缝左端与横板交汇处; 方案二残余应力最大值为 508.887 MPa, 位于上盖板焊缝左端与横板交汇处; 方案三残余应力最大值为 499.504 MPa, 位于靠近上盖板中间处; 方案四残余应力最大值为 502.687 MPa, 位于下盖板与立板交汇顶端处。

图 6 四种方案 Von-Mises 残余应力云图

四种方案残余应力峰值及峰值节点位置大致相同。其中方案一和方案二的残余应力分布基本一致, 方案三和方案四的残余应力分布基本一致。但方案三和方案四的残余应力峰值与方案一和方案二相比有所降低。由此可以初步说明: 定位焊接顺序对焊接残余应力的分布影响很小, 而组焊接的焊接顺序对横向止挡最大残余应力的影响起主要作用。

3.2 整体变形情况分析

横向止挡四种方案焊接变形情况如图 7~9 所示。四种方案 X 方向的变形约为 1 mm, 最大变形位置均在横向止挡 II 端, 方案一、二变形大小接近, 方案三、四变形大小接近。说明定位焊对 X 方向的变形影响较小, 焊序的影响占主要因素, 焊序方案二优于焊序方案一; 四种方案在 Y 方向的变形约为 0.5 mm, 方案一变形为 0.51 mm, 方案二变形 0.71 mm, 方案三变形为 0.52 mm, 方案四变形 0.47 mm, 方案二变形波动较大, 其余三种方案变形基本相同; 四种方案 Z 方向的变形约为 1 mm, 最大变形位置在横向止挡中间, 四种方案 Z 方向变形差别较小。综合 X 、 Y 、 Z 三个方向的变形来看, 横向止挡 X 、 Z 方向的变形量最大, 变形量 1.2 mm 左右, 横向止挡 Y 方向的变形最小, 变形量 0.5 mm 左右。

图 7 四种方案 X 向变形云图

图 8 四种方案 Y 向变形云图

图 9 四种方案 Z 向变形云图

4 主焊缝残余应力情况讨论

为了更清楚地表示焊缝所在的位置,对横向止挡模型的方位做出标记。 A 面指带有横向减振器座侧的横向止挡座立板面, B 面是指与 A 面相对的面。 I 端表示横向止挡弹簧安装座侧, II 端表示弹簧安装板侧,如图 10 所示。

图 10 横向止挡模型方位标定

4.1 上盖板 A 面焊缝残余应力对比分析

上盖板 A 面焊缝残余应力分布如图 11 所示。

由于整体结构焊缝不仅包括直线焊缝,还存在与三维坐标轴成任意角度的曲线焊缝,因此横坐标不能用 XYZ 坐标轴中某个方向的位移表示。此处利用数学上无限分割、化曲为直的思想,即提取每个单元的边长并求和作为横坐标,单位为 mm 。

图 11 上盖板 A 面焊缝残余应力分布

从图 11 中可以看出:方案一与方案二残余应力曲线图基本一致,方案一与方案二均采用第一种焊接顺序,区别在于定位焊顺序的不同。由此可见,定位焊顺序的不同对方案一和方案二的残余应力分布几乎没有影响;方案三与方案四残余应力曲线图变化趋势一致,方案三与方案四均采用第二种焊接顺序,区别在于定位焊顺序的不同,这也说明,定位焊顺序的不同对方案三和方案四的残余应力分布影响不大。方案三与方案四残余应力值整体在方案一与方案二之下,说明焊接顺序 b 相比焊接顺序 a ,在该焊缝处残余应力整体较小。

4.2 上盖板 B 面焊缝残余应力对比分析

上盖板 B 面焊缝残余应力曲线图如图 12 所示。

图 12 上盖板 B 面焊缝残余应力分布

从图 12 中可以看出,该焊缝处四种方案应力曲线基本一致,横向止挡 II 端到止挡座短立板 I 端焊缝应力比较平稳,焊缝两端应力较高,中间应力较低,最大应力峰值为 $450 MPa$,最小应力为 $200 MPa$ 。四种方案在该焊缝处残余应力差别较小。

4.3 A 面下盖板焊缝残余应力对比分析

下盖板与立板主焊缝主要看 A 面与 B 面圆滑-直线-圆弧处应力分布情况。图 13~15 为 A 面由 I 端至 II 端焊缝残余应力分布情况。

图 13 下盖板与立板 A 面焊缝位置

图14 A面I端圆弧处焊接残余应力

图15 A面中间直线处焊接残余应力

从图14可以看出,方案三与方案四应力曲线基本一致,且残余应力整体在方案一、二之下,说明两种定位焊对焊序二的残余应力影响较小。从图15可以分析出焊缝两端残余应力较高,两筋板之间残余应力较小。方案一、二两端残余应力明显高于方案三、四,应力峰值达到420 MPa,方案三、四残余应力曲线基本一致,两种定位焊对焊序二下残余应力的影响较小。从图16可以看出,方案一、二残余应力曲线基本一致,方案三、四残余应力曲线基本一致,说明定位焊方案对残余应力的影响较小,焊序的影响起主要作用。

图16 A面II端圆弧处焊接残余应力

4.4 B面下盖板焊缝残余应力对比分析

下盖板与立板B面焊缝位置如图17所示。如图18~20为B面由I端至II端焊缝残余应力分布

情况。

图17 下盖板与立板B面焊缝位置

图18 B面I端圆弧处焊接残余应力

图19 B面中间直线处焊接残余应力

图20 B面II端圆弧处焊接残余应力

从图18可以看出,四种方案在该焊缝处应力分布比较平稳,方案二焊缝上的应力高于方案一,方案三、四残余应力曲线基本一致,焊序对残余应力的影响占主要作用。从图19可以分析出焊缝中间位置应力值低于两端。从图20可以看出方案三、四在上焊趾和焊缝上的位置残余应力曲线波动幅度较

小, 应力较稳定, 方案一、二残余应力变化幅度较大, 应力峰值达到 450 MPa。

4.5 弹簧安装座 A 面焊缝残余应力对比分析

弹簧安装板处主焊缝主要看弹簧安装板与长、短立板之间的焊缝残余应力分布情况。弹簧安装座 A 面焊缝位置如图 21 所示。图 22 为弹簧安装板与长立板之间主焊缝的应力分布情况。

图 21 弹簧安装座 A 面焊缝位置

图 22 弹簧安装座 A 面焊缝残余应力分布

从图中可以看出方案一、二残余应力曲线基本一致, 方案三、四残余应力曲线基本一致, 也可以说明两种定位焊对残余应力的影响较小, 焊序的影响起主要作用。焊缝两端残余应力较高, 中间焊缝残余应力较低, 这是由于焊缝端部有焊缝交叉, 导致应力集中。

4.6 弹簧安装座 B 面焊缝残余应力对比分析

弹簧安装座 B 面焊缝位置如图 23 所示。弹簧安装座 B 面焊缝残余应力分布如图 24 所示。

图 23 弹簧安装座 B 面焊缝位置

从图中可以看出, 方案一、二残余应力曲线基本一致, 方案三、四残余应力曲线基本一致, 说明定位焊对残余应力的影响较小。方案一、二应力峰值高于方案三、四, 残余应力随横坐标增加而增加。

图 24 弹簧安装座 B 面焊缝残余应力分布

焊序二方案残余应力波动较小。

5 试验对比分析

横向止挡在进行焊接试验(图 25)时, 通过使用专用工装进行夹紧定位, 定位焊时采用手工点固焊接, 组焊时采用机械手自动化焊接, 按照预先设定的四种焊接方案进行试验。

图 25 横向止挡定位焊

定位焊时, 分别根据定位焊顺序 a 与定位焊顺序 b 将零件依次进行点固焊接。测量时, 将定位焊工件放于检测平台进行卡尺测量, 分别测量其弯曲度及扭曲度偏差(图 26)。通过测量不同定位焊工件发现, 其弯曲度及扭转度结果相差不大。说明定位焊焊接顺序对横向止挡焊接变形量的影响较小。

图 26 定位焊弯曲度扭曲度测量

针对不同的定位焊工件进行机械手自动化焊接(图 27), 并采用三坐标测量仪进行尺寸测量。结果表明, 分别采用四种焊接方案的工件在不同程度上出现弯曲及扭曲现象。四种方案 X 向变形情况相差不多, 平均变形量在 1.1 mm 左右, 其中方案一与方案二测量结果接近, 最大变形量为 1.16 mm, 方案三与方案四结果接近最大变形量为 1.04 mm; 四种方案 Y 向变形均不大, 变形量最大值均值为 0.45 mm; 四种方案 Z 向变形量差别较大, 方案一最大变形量 1.29 mm, 方案二最大变形量 1.18 mm, 方案三最大变形量 1.16 mm, 方案四最大变形量 1.09 mm, 最大变形位置在横向止挡中间位置。

图 27 横向止挡机械手组焊

综上, 四种方案 X 、 Z 向变形较大, Y 向相对变形最小, 趋势与仿真计算结果相符。造成该现象的原因是由于弹簧安装座与弹簧安装板的坡口较大, 相对热输入量较大, 并且两个锻件与钢板的刚度不同, 造成横向止挡 X 向、 Z 向焊接变形较大。同时, 由于焊接顺序的不同, 使工件在焊接过程中发生热变形的先后顺序不同, 造成横向止挡整体扭转及弯曲现象。

6 结论

(1) 从焊接变形情况看, 定位焊焊接顺序对焊接变形的影响较小。组焊顺序对焊接变形的具有明显的影响, 且第二种组焊焊接顺序方案能较好地起到抵制变形作用。

(2) 从焊接残余应力情况看, 定位焊接的焊接顺序对焊接残余应力的分布影响较小。组焊顺序对残余应力的分布具有明显的影响, 且第二种组焊焊接顺序方案较第一种组焊焊接顺序方案为优。

(3) 从实施及安全性角度来看, 定位焊方案一位置大部分在三条焊缝相交处, 定位焊实施难度较大, 可靠性较低, 定位焊方案二定位位置更为合理实施比较方便。

(4) 从应力峰值来看, 方案三、四残余应力峰

值低于方案一、二, 方案四整体应力值波动较小较稳定, 因此, 采用方案四焊接方法能有效控制残余应力及焊接变形。

(5) 四种方案 X 、 Z 方向变形较大, Y 方向相对变形最小。不同的焊接顺序使工件在焊接过程中热变形顺序不同及整体热输入不均, 造成横向止挡整体收缩及扭转、弯曲现象。

参 考 文 献

- [1] 雷霜, 颜志军. 土耳其 IZMIRL 非动力转向架横向止挡座的结构设计[J]. 技术与市场, 2013(4): 43-44.
LEI Shuang, YAN Zhijun. Structural design of lateral stop seat of IZMIRL non-power bogie in Turkey[J]. Technology and market, 2013 (4): 43-44.
- [2] 刘建新, 王开云, 封全保. 机车车辆二系横向止挡动力学模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 12-14.
LIU Jianxin, WANG Kaiyun, FENG Quanbao. Dynamic model of two-system lateral stop of locomotive and vehicle [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 7(5): 12-14.
- [3] 张世欣, 韩建民, 王明岩, 等. 基于 SYSWELD 仿真的 B 型地铁侧梁焊接工艺优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(1): 6-10.
ZHANG Shixin, HAN Jianmin, WANG Mingyan, et al. Welding process optimization of b-type subway side beam based on SYSWELD simulation [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2014, 52(1): 6-10.
- [4] 刘建新, 王开云, 封全保. 机车车辆二系横向止挡结构参数[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(4): 469-472.
LIU Jianxin, WANG Kaiyun, FENG Quanbao. Lateral stop structural parameters of the second system of locomotives and rolling stock[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(4): 469-472.
- [5] 衣晨阳. 动车组横向止挡减振器有限元仿真及性能预测研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
YI Chenyang. Finite element simulation and performance prediction of transverse damper for EMU [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017.
- [6] 纪天成. 制动条件下二系横向止挡参数对重载机车车体与车钩横向动态性能影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
JI Tiancheng. Research on the influence of two lateral stop parameters on the lateral dynamic performance of heavy load locomotive body and hook under braking conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 祁建伟, 安博, 胡文浩, 等. 转向架横向止挡座自动化焊接技术[J]. 焊接技术, 2017(10): 95-96.
QI Jianwei, AN Bo, HU Wenhao, et al. Automated

- welding technology for transverse stop of bogie [J]. Welding Technology, 2017(10): 95-96.
- [8] KEIVANI R, JAHAZI M, PHAM T, et al. Predicting residual stresses and distortion during multisequence welding of large size structures using FEM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1): 409-419.
- [9] 孙传政, 潘亦苏, 罗征志. 基于 SYSWELD 的列车转向架结构焊接数值模拟[J]. 电焊机, 2012, 42(10): 25-27. SUN Chanzheng, PAN Yisu, LUO Zhengzhi. Welding numerical simulation of train bogie structure based on SYSWELD[J]. Welding Machine, 2012, 42(10): 25-27.
- [10] 罗征志, 曾京, 方华伟. 封头坯料拼焊成形焊接残余应力分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 127-133. LUO Zhengzhi, ZHENG Jing, FANG Huawei. Residual stress analysis of tailor-welded head blanks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 127-133.
- [11] 鲍亮亮, 王勇, 韩涛, 等. Q345E 热丝 TIG 焊接头微观组织与力学性能研究[J]. 焊接, 2019, 548(2): 60-64, 74. BAO Liangliang, WANG Yong, HAN Tao, et al. Microstructure and mechanical properties of Q345E hot wire TIG welded joint [J]. Welding, 2019, 548(2): 60-64, 74.
- [12] 李滋亮, 刘剑桥, 任森栋, 等. 尺寸因素对 SUS304 不锈钢残余应力和焊接变形的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 59-67. LI Ziliang, LIU Jianqiao, REN Shendong, et al. Effect of size factor on residual stress and welding deformation of SUS304 stainless steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 59-67.
- [13] GOLDAK J. A new finite model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions, 1984, 15: 299-305.
- [14] 郑乔, 逯世杰, 李索等. 熔敷顺序和管壁厚度对异种钢管板接头焊接残余应力与变形的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 46-53. ZHENG Qiao, LU Shijie, LI Suo, et al. Effects of depositing sequence and wall thickness on welding residual stress and deformation of dissimilar steel tube sheet joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 46-53.
- [15] 胡兴, 戴培源, 张超华, 等. 合并焊道法对 SUS304 不锈钢平板对接接头焊接残余应力计算精度和效率的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 72-82. HU Xing, DAI Peiyuan, ZHANG Chaohua, et al. The effect of combined bead method on the accuracy and efficiency of calculating welding residual stress of SUS304 stainless steel plate butt joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 72-82.
- [16] 蔡建鹏, 叶延洪, 张彦杰, 等. 坡口形式对 Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 55-61. CAI Jianpeng, YE Yanhong, ZHANG Yanjie, et al. Effect of groove form on residual stress and deformation of Q345/SUS304 dissimilar steel butt joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 55-61.
- [17] 徐济进, 陈立功, 倪纯珍. 机械应力消除法对焊接残余应力的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 291-295. XU Jijin, CHEN Ligong, NI Chunzhen. Effect of mechanical stress relief method on welding residual stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 291-295.
- [18] 纪天成. 制动条件下二系横向止挡参数对重载机车车体与车钩横向动态性能影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. JI Tiancheng. Research on the influence of two lateral stop parameters on the lateral dynamic performance of heavy load locomotive body and hook under braking conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [19] 胡文浩, 孙进发, 许鸿吉, 等. 焊接顺序对动车组电机吊架焊接残余应力和变形的影响规律研究[J]. 焊接技术, 2018(4): 133-138. HU Wenhao, SUN Jinfa, XU Hongji, et al. Study on the influence of welding sequence on welding residual stress and deformation of motor hanger of EMU [J]. Welding Technology, 2018 (4): 133-138.

作者简介(通信作者): 刘阳, 男, 1991 年出生。主要研究方向为轨道车辆设计及焊接工艺、车辆动力学仿真等工作。
E-mail: liuyang3.ts@crrecg.cc