

# 基于TRIZ理论的车体焊接变形控制方法

康丽齐 孙志鹏 王 香 邵有发 王成菲 张雪峰 杨 扬

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术部, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

**摘要** 以TRIZ的理论为创新工具,对不锈钢车辆车体焊接变形的行业难题进行分析,并运用TRIZ的原理和方法进行求解;通过功能分析及因果分析方法对焊接变形问题的产生原因详细分析;以焊接过程中的过剩热量和热量传递为切入点,找到4个根本原因,分别用TRIZ理论中的技术矛盾、物理矛盾、物场模型、效应理论等工具分别对问题进行问题求解;对求解方案进行现场试验验证,最终得到综合的理想解做为实施控制方案。

**关键词** TRIZ理论; 不锈钢车体; 焊接变形

**中图分类号** U270.6<sup>+</sup>4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.04.001

## Control Method of Metro Car-body Welding Deformation Based on TRIZ Theory

KANG Liqi, SUN Zhipeng, WANG Xiang, SHAO Youfa, WANG Chengfei, ZHANG Xuefeng, YANG Yang

**Abstract** In this paper, TRIZ theory is used as an innovative tool to analyze the problems of stainless steel car-body welding deformation in rail transit industry, the principle and method of TRIZ are applied to solve the problems. Through functional analysis and causal analysis methods, the causes of welding deformation are analyzed in detail. Starting from the excess heat and heat transfer in the welding process, four root causes are detected. The technical contradiction, physical contradiction, material field model, effect theory and other tools in TRIZ theory are used to solve these problems respectively, and the solution scheme is verified by field tests. Finally, the comprehensive ideal solution is obtained as the implementation control scheme.

**Key words** TRIZ theory; stainless steel car-body; welding deformation

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

轨道客车的车体采用焊接技术完成零部件的连接。焊接变形会导致车体结构尺寸超差,影响下道装配工序的执行,严重的会导致产品报废。因

此,焊接变形控制的研究对车辆制造企业来说是非常重要的工作,也是能够为企业带来经济效益的重点工作。

TRIZ (Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadach)源自俄文的拉丁文缩写,意为“发明问题解决理论”。TRIZ理论揭示事物的技术系统是按照一定规律在发展,这些规律就是矛盾矩阵,包括39个参数、40个创新原理及物理矛盾的分离原则<sup>[1]</sup>。采用这套理论来发现问题、分析问题、解决问题,可以帮助研究人员转变分析问题的思维方式,找到解决问题的新方法。本文通过TRIZ理论研究轨道客车车体焊接变形的控制方法。

## 1 TRIZ理论简介

国际著名的TRIZ理论专家Savransky博士给出了TRIZ理论的定义:TRIZ理论是基于知识的、面向人的解决发明问题的系统化方法学<sup>[2]</sup>。TRIZ理论不仅提供了分析工程问题所需要的方法,包括功能分析、因果分析、资源分析和物场分析,同时还提供了相应的问题求解工具,包括解决技术矛盾的发明原理、解决物理矛盾的分离原理、科学原理知识库和发明问题标准解法等。另外,TRIZ理论还包括了一些新的思维方法,例如多屏幕法、小人法、金鱼法等<sup>[3]</sup>。

企业的一线工程师面对生产实际技术问题,在TRIZ理论的启发、指导和帮助下,可以发现技术难题的瓶颈,挖掘可利用的资源,找到解决问题的原理和方法,形成解决实际问题的方案。部分解决方案还可申请国家专利,也可给企业带来显著的经济效益<sup>[4]</sup>。

## 2 车体焊接变形问题

### 2.1 车体焊接过程

轨道车辆的车体制造由零件冲压制造、车体焊

接制造,以及加工、装配、涂装、调试、转向架焊接组装等工序组成,其中车体的焊接工序和转向架的焊接工序是一项特殊的特殊工序。焊接工序工时占整个车辆制造工序工时的39%。

不锈钢材质车体的侧墙焊接工序中,连接板的MAG(熔化极活性气体保护电弧焊)对接焊的焊接原理如图1所示。其焊接过程是输入热量,在焊枪端部产生电弧,电弧熔化母材和焊丝并形成液态金属,液态金属冷却后形成固态金属焊缝。焊接的融化过程中,由于是局部材料的熔化,所以热应力释放会使材料发生蠕变,产生焊接变形<sup>[5]</sup>。

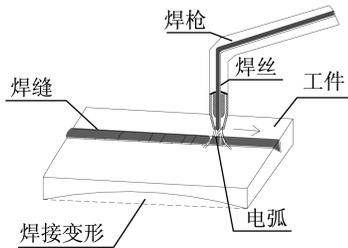


图1 车体侧墙连接板对接焊的焊接示意图

## 2.2 焊接变形问题

车体焊接变形问题目前是非常关键的技术问题。焊接变形导致车体尺寸超差,造成劣质产品,无法交付业主,严重的产品报废,给企业经济效益带来损失。国外企业包括日本车辆公司、法国ALSTOM公司、西门子公司、庞巴迪公司等主要车辆制造企业也将焊接变形做为车体生产中需要重点解决的问题。

通过对国内850个关于焊接变形控制方法的专利检索发现,大部分的焊接变形解决方法是在工装上增加反变形的办法,也有采用改变焊接工艺方法和改变焊接顺序的解决方法。反变形方法主要是采用火焰调修技术,也有少量的是采用机械校正技术。

## 2.3 现有主要解决方案的缺点

目前,工装上增加预制反变形、焊接后进行火焰调修,这两种解决焊接变形方法均存在不同程度的缺点,影响焊接变形的控制。

工装上预制反变形方法需要预测焊接变形发生的位置和焊接变形的量,才能在工装的定位位置增加反变形垫板,但经常是由于预测的位置和变形量不准确,焊后的产品还存在超过尺寸公差要求的

焊接变形,需要第二次重新调整工装增加反变形,调整工装比较复杂,需要反复调整焊接试件后再调整工装。

火焰调修矫正焊接变形方法是利用热胀冷缩原理,因此需要对产生变形的工件用烤枪加热,再用水冷却,以达到矫正焊接变形的目的。在矫正过程中,大量用水会造成厂房积水,地面湿滑,影响施工安全。另外,对于复杂的焊接变形,用火焰调修技术还不能矫正到符合公差要求的结构尺寸,仍可能造成产品报废。

## 2.4 解决问题的约束条件

焊接变形问题的解决方案中,不能改变的约束条件有以下3个:①焊接设备不能复杂化;②不能对厂房有过多的土建改造;③形成焊缝的母材需要完全熔化,焊接后能满足连接强度的要求。前两个约束条件的目的是在解决焊接变形问题过程中,减少设备和厂房改造的成本投入,以最小的经济投入来解决问题。第3个约束条件的目的是要基于焊接过程技术,不能基于如粘接技术等其他技术。

## 3 用TRIZ理论解决问题流程

TRIZ理论以辩证法、系统论和认识论为哲学指导,以自然科学、系统科学、思维科学的研究成果为根基和支柱,以技术系统进化法则为理论基础,包括了技术系统和技术过程(技术系统进化过程产生)矛盾、(解决矛盾所用的)资源、(技术系统的进化方向)理想化等基本概念<sup>[3]</sup>。

### 3.1 功能分析

在TRIZ理论中,功能的定义是由一个组件执行的改变或维护另一个组件的参数动作,功能描述的形式是:组件+V(动作)+组件+参数<sup>[4]</sup>。焊接过程是使填充金属和母材熔化后,冷却形成焊缝,实现两个工件的连接。对于外接电源驱动的焊接设备,焊接过程是在外接电源的作用下,焊丝与母材间形成一定的电压,产生电弧,电弧熔化母材和填充金属,形成熔池,冷却后形成焊缝。操作者手持焊枪,沿着焊缝长度方向移动,实现焊接,焊接工装支撑工件,焊接工件附近的热量散发元件对焊缝和母材起到冷却作用。

侧墙部件焊接过程的功能模型如图2所示。从图2可以看出:存在“有害功能”和“不足功能”<sup>[6]</sup>,手臂支撑焊枪是不足功能,焊枪压迫手臂是有害功能;参与焊接过程中散发热量的元件对工件的散热

作用不好。

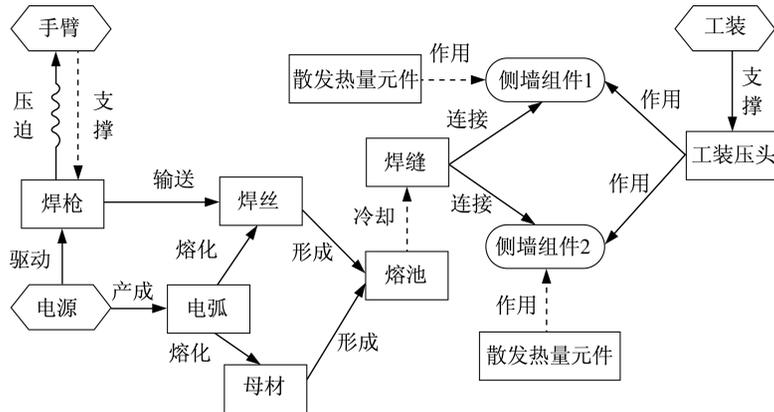


图2 侧墙部件焊接过程功能图

### 3.2 因果链分析

研究焊接过程中的热量散发问题是从焊接机理上控制焊接变形的最主要手段,然后进一步再运用因果链分析找到根本的底层原因。越从底层解决问题,问题越容易解决,同时解决问题所需要的经济成本越低。从产生热量和散热角度分析对焊接

变形的影响的因果分析如图3所示。由图3可以看出,焊接过程中热输入过大,焊接后热量传输路径缺少,工件散热不均匀,以及参与散热的工件缺少是产生焊接变形的主要原因。因此,从这4个方面可以运用TRIZ理论来研究解决问题。

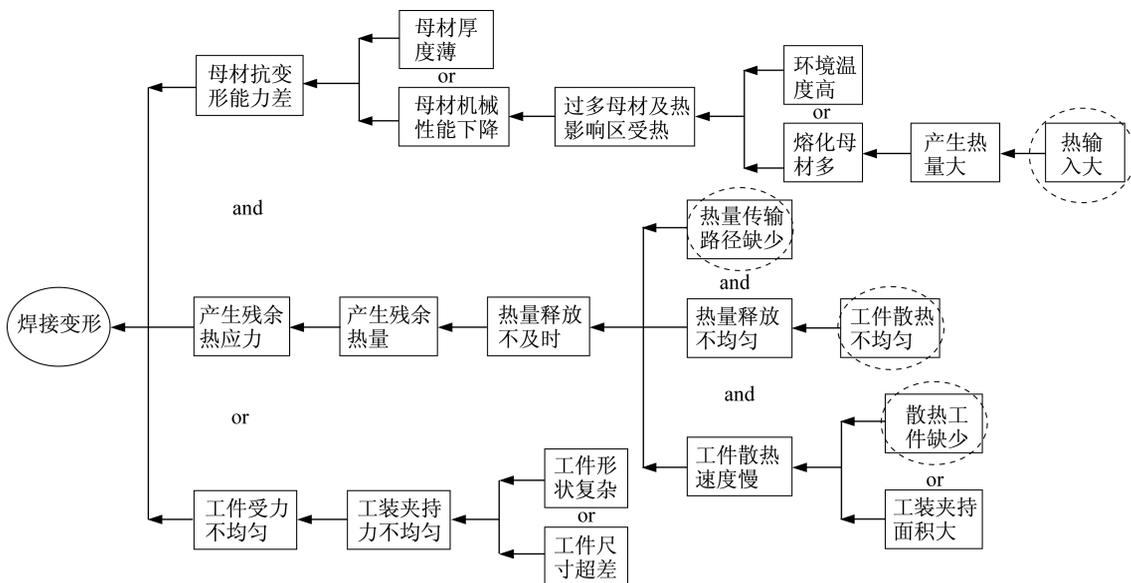


图3 产生焊接变形问题的因果分析

### 3.3 采用 TRIZ 理论解决问题

运用TRIZ理论中的“技术矛盾”<sup>[7]</sup>、“物理矛盾”<sup>[7]</sup>、物质与场分析<sup>[8]</sup>、效应理论<sup>[6]</sup>、裁剪法等工具分析问题,找到控制焊接变形的办法。

#### 3.3.1 “热输入大”问题解决办法

为了实现焊接的要求,需要热量多,但为了焊接变形小,又需要热量小。转换成TRIZ理论中“矛

盾矩阵”的描述就是:改善的参数是“可制造性、可维护性”的,恶化的参数是“时间损失、物质的量”。

利用“矛盾矩阵”<sup>[7]</sup>原理中序号35的“物理和化学参数改变原理”<sup>[5]</sup>得到的方法1是:对厚度小于3 mm材料的薄板位置的焊接,焊丝直径由 $\Phi 1.2$  mm改成 $\Phi 1.0$  mm。减少热输量,控制了焊接变形。

利用“矛盾矩阵”<sup>[7]</sup>原理中序号17的“空间维数

变化原理”得到方法2是:将厚板的焊接接头在空间上采用多层多道焊接方式,打底—焊接—盖面的焊接方式,控制每一道焊接的热输入。

利用裁剪法,组件C可以完成A的有用功能,那么组件A可以被裁剪掉的原则,如图4所示。

根据图2所示的功能图,可得到的方法3是:将元件“焊丝”裁掉,如图5所示。在焊接过程中,不用焊丝作为填充金属,由组件C电阻点焊设备完成焊接,采用电阻点焊的工艺技术。

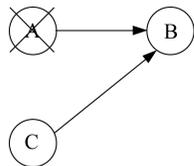


图4 TRIZ理论中的裁剪原理图

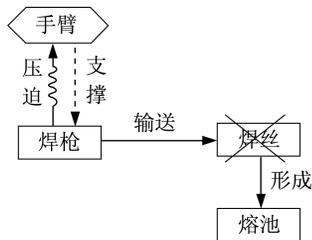


图5 焊接变形分析的裁剪原理图

### 3.3.2 “热量传输路径缺少”问题解决方法

利用TRIZ理论中“效应理论”的“导热性效应、辐射感应效应”<sup>[6]</sup>,得到的方案4是:有焊接要求的工件如果有孔结构,在工艺条件允许时,孔采用后开方式,使热量释放不绕孔走直线路径。或者采用的方案5是:有孔物料焊接前在孔的位置点固定导热工艺板,当热量传输到孔位置时有散热通道可走。

### 3.3.3 “工件散热不均匀”问题解决方法

利用TRIZ理论中“物质-场分析及76个标准解”工具,根据图2给出的焊接过程功能图,建立如图6所示的物质-场模型。该模型用符号表示功能模块,其中S2为手臂,S1为焊枪,F1为机械场。

应用TRIZ理论中的No.3标准解来解决流程图

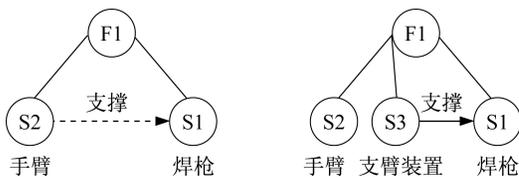


图6 改进前物质-场示意图 图7 改进后物质-场示意图

题,得到的标准解为“假如系统不能改变,但永久的或临时外部添加物剂改变S1或S2是可以接受的”。

得到的方案6是:增加支臂装置来支撑手腕,保持焊枪稳定、焊接速度均匀、热输入均匀及散发热量均匀,以便控制变形。改进之后的物质-场模型如图7所示。

利用TRIZ理论中的“技术矛盾”工具解决提高被焊接工件散热均匀性问题。如果采用的方法是改变焊接顺序,则会导致侧墙焊接过程变得复杂,因此转换成TRIZ理论的标准冲突是:改善的参数是“适应性”;恶化的参数是“可制造性”。利用矛盾矩阵中序号1的“分割原理”,得到的方法7是:将连续和集中的焊缝进行分割,采用分次序焊接方式,焊接第①段后,对称焊接第②段,让第①段焊缝进行充分热量释放,再焊接第③、④、⑤段,即①→②③→④→⑤。这种焊接方式改善了工件散热均匀性,如图8所示。

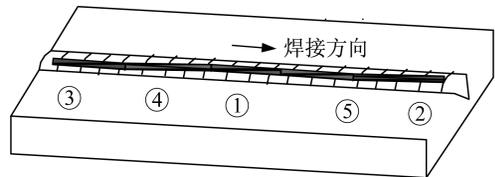


图8 分段焊接示意图

### 3.3.4 “散热工件少”问题解决方法

为了“将作用到工件上的热量快速释放”,需要参与“散热工件”为“多”,但又为了“焊接操作方便”,需要参与“散热工件”为“少”。针对“散热工件”既要“多”又要“少”的矛盾,以及“散热工件”在不同的“空间下”具有不同特性的冲突,可以从“空间”上进行分离。依据TRIZ理论中“物理矛盾”空间分离的No.24原理“借助中介物原理”,得到的方法8是:工装压头采用铜板材料,利用铜散发热量快的特性来提高焊缝周围热量的释放。

## 4 解决问题最终方法

对以上得到的8个创新方法进行汇总并试验评估,得出的结果如表1所示。经过评估和现场试验验证,确定最终方法。最终方法是多个方法的组合方法,即对不锈钢车体焊接变形的控制方法是:采用 $\Phi 1.0$  mm焊丝;电阻点焊工艺;采用支臂装置;长大焊缝采用分次序焊接工艺;结构材料厚度大的小件采用多层多道焊接工艺。

(下转第23页)