

# 基于 TRIZ 理论的搅拌摩擦焊工艺装备优化方案

黄林 王世君 耿明 范明保 魏宏迪

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春)

**摘要** [目的] 搅拌摩擦焊是新一代焊接技术的重要工艺。为解决搅拌摩擦焊存在的焊接质量缺陷问题, 应对搅拌摩擦焊工艺进行深入研究, 并探讨其工艺装备的优化方案。[方法] 对搅拌摩擦焊的工作机理进行研究, 得到搅拌摩擦焊 4 类常见的质量缺陷类型。基于 TRIZ(萃智)理论, 对焊接过程中可能产生的质量缺陷进行了问题分析, 得到搅拌摩擦焊质量缺陷的 3 对技术矛盾。查询 TRIZ 理论的矛盾矩阵, 根据矛盾矩阵提示的发明创新原理, 对搅拌摩擦焊现有的焊接工艺及焊接工器具进行了优化, 提出了搅拌头轴肩结构优化、搅拌头结构优化、金属保温圈罩优化 3 个优化方案。利用层次分析法, 对这 3 个优化方案进行了比选, 得到最佳优化方案。[结果及结论] 最佳优化方案为搅拌头轴肩结构优化方案。该方案能有效克服搅拌摩擦焊的焊接质量缺陷, 提高焊接质量, 且能提高焊接加工效率。

**关键词** 轨道交通车辆; 车体焊接; 搅拌摩擦焊; 工艺装备优化; 萃智理论; 层次分析法

**中图分类号** U270.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.02.010

## Optimization of Friction Stir Welding Process Equipment Based on TRIZ Theory

HUANG Lin, WANG Shijun, GENG Ming, FAN Mingbao, WEI Hongdi

(Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] Friction stir welding is a key welding technology for next-generation. To address welding quality defects associated with friction stir welding, it is necessary to conduct an in-depth study of its welding process and explore its equipment optimization strategies. [Method] The working mechanism of friction stir welding is analyzed, identifying four common types of its quality defects. Based on TRIZ theory, potential quality defects in the welding process are examined, leading to the identification of three pairs of technical contradictions. By querying the contradiction matrix in TRIZ theory, inventive principles are derived to optimize existing welding processes and equipment. Based on this, improvement of the stir pin shoulder structure, optimization of the stir pin design, and enhancement of the metal insulation ring cover three opti-

mization strategies are proposed. These optimization strategies are evaluated using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine the best solution. [Result & Conclusion] Improvement of the stir pin shoulder structure is the optimal solution, it effectively addresses the welding quality defects of friction stir welding, improves welding quality, and enhances processing efficiency.

**Key words** rail transit vehicle; carbody welding; friction stir welding; optimization of process equipment; TRIZ theory; analytic hierarchy process

## 1 TRIZ(萃智)理论简介

搅拌摩擦焊接头焊接时可能出现的质量缺陷主要包括孔洞、飞边、未焊合和沟槽等<sup>[1]</sup>。为了降低此类质量缺陷的发生频率, 本文对现有搅拌头结构方案的优化进行重点研究。前苏联海军部专利专家 Genrieh Alt-shuller 从 1946 年开始, 对数以百万计的专利文献进行研究, 提炼出一套解决复杂技术问题的系统理论——TRIZ 理论。TRIZ 理论体系探讨了技术系统演变规律, 可以大大拓宽工程人员的思路, 为设备的创新方案选择提供广泛的可能性。在应用 TRIZ 理论解决实际问题的过程中, 可以参考其特定的流程, TRIZ 理论解决问题的流程如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

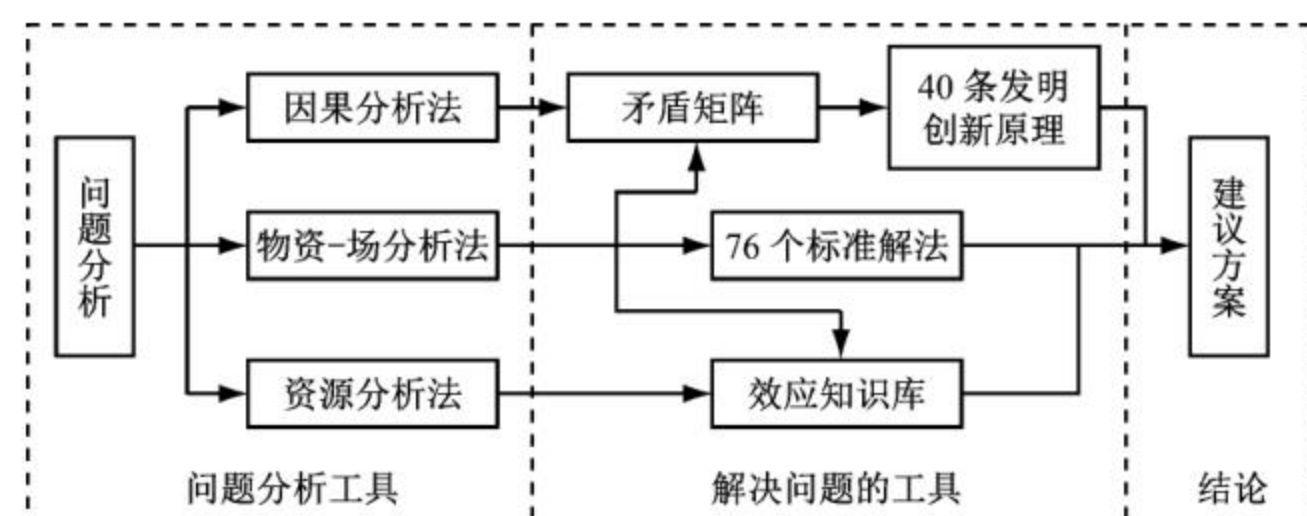


图1 TRIZ理论解决问题的流程

Fig. 1 Process of solving problems based on TRIZ theory

本文采用因果分析法和矛盾矩阵这 2 个解决问题的工具, 发现搅拌摩擦焊焊接过程中可能出现的

质量缺陷,从工艺方法和工具使用上寻求优化方案。

## 2 搅拌摩擦焊工艺装备优化的方法

### 2.1 问题分析

通过问题分析,分析产生问题的因果链,找到问题产生的最根本原因。从这些最根本的原因入手,进一步分析问题产生的其他原因,进而找到最有效解决问题的方法。

### 2.2 矛盾分析

通过问题分析得到问题产生的根本冲突点,进而发现现有技术系统中存在的技术矛盾或物理矛盾。查阅矛盾矩阵,找到对应的发明创新原理。通过对原理进行分析及对创新发明原理进行应用,得到解决问题的方案。

## 3 采用 TRIZ 理论分析搅拌摩擦焊工艺装备

### 3.1 搅拌摩擦焊质量缺陷的问题分析及理想解

采用因果图方法,对孔洞缺陷、沟槽缺陷、飞边缺陷及未焊合缺陷这4类在搅拌摩擦焊焊接过程中可能产生的质量缺陷进行问题分析,从而发现问题产生的根本原因,为下一步的矛盾分析提供解题资源。搅拌摩擦焊质量缺陷因果图如图2所示。

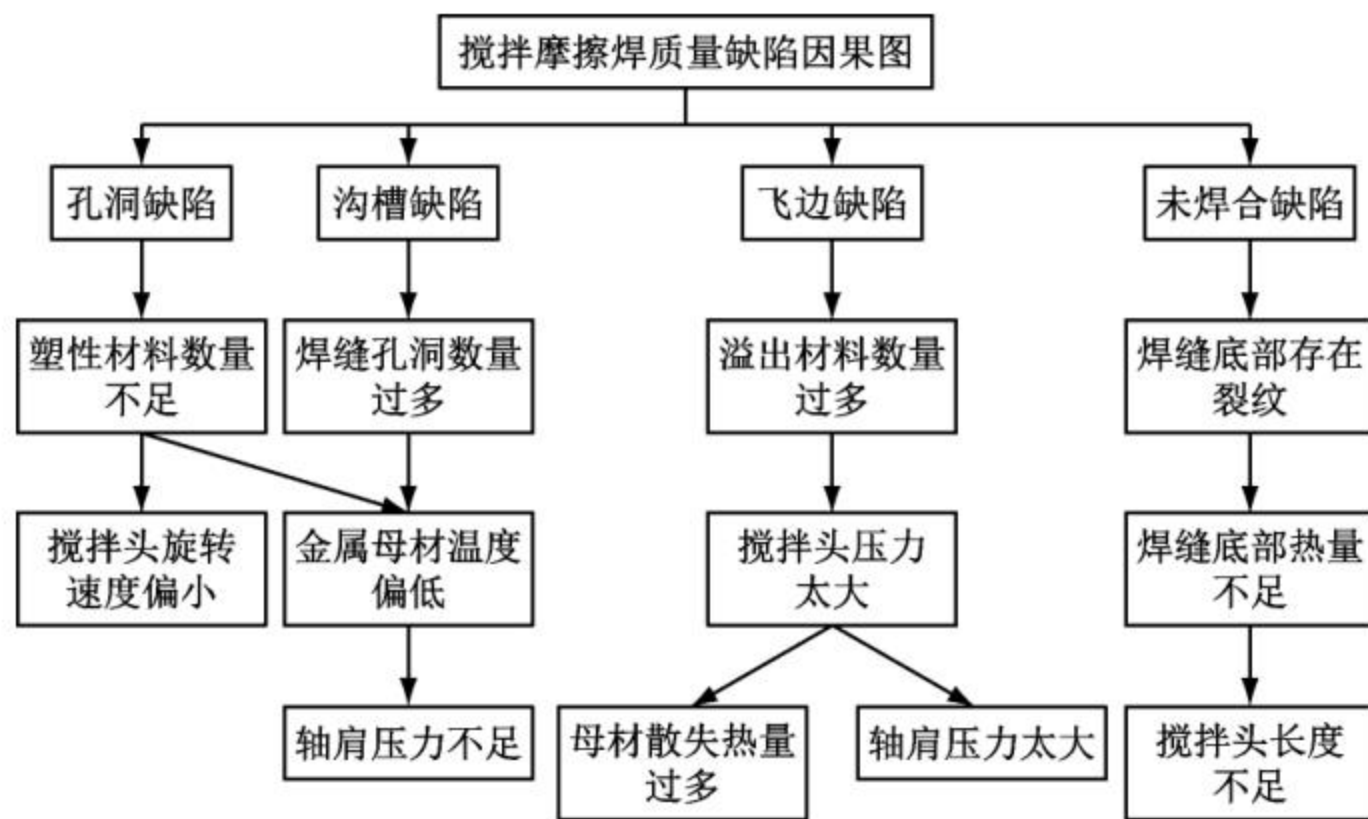


图2 搅拌摩擦焊质量缺陷因果图

Fig.2 Causality diagram of quality defects in friction stir welding

搅拌摩擦焊质量缺陷的理想解为:避免在加工过程中产生孔洞缺陷、沟槽缺陷、飞边缺陷及未焊合缺陷这4类加工质量缺陷,保证一次焊接的成功率为100%,且最大程度提高焊接加工的效率。

### 3.2 搅拌摩擦焊质量缺陷的矛盾分析

通过对以上技术系统的分析,可以得到搅拌摩擦焊质量缺陷的3对矛盾。

#### 3.2.1 第1对矛盾

为了解决焊接温度偏低问题,在焊接过程中需

要更多的热量,因此搅拌头的轴肩需要提供更大的压力,而压力过大会改变母材金属的结构,进而造成飞边缺陷。依据 TRIZ 理论,该问题是由于待提高的通用工程参数 17(温度)和问题恶化的参数 12(形状)之间构成了技术矛盾。

#### 3.2.2 第2对矛盾

为了避免发生未焊合缺陷,搅拌头的长度需与金属母材的厚度相当。因此,在加工不同厚度的金属母材时,需要更换不同长度的搅拌头,而更换搅拌头会增加操作时间,影响加工效率。依据 TRIZ 理论,该问题是由于问题待提高的通用工程参数 3(运动物体的长度)和问题恶化的参数 33(可操作性)之间构成了技术矛盾。

#### 3.2.3 第3对矛盾

搅拌摩擦焊的焊接工作区域是开放的技术系统,环境里的空气会与系统内的热气进行交换并带走部分热量,从而构成了问题待提高的通用工程参数 35(适应性及多样性)和问题恶化的参数 22(能量损失)之间的技术矛盾。

### 3.3 搅拌摩擦焊质量缺陷技术矛盾的优化方案

技术矛盾的解决措施是查询矛盾矩阵,以获得解决该技术矛盾的发明原理编号提示的优化方案。然后根据不同创新发明原理的内容,适当地选择适合的发明原理,并根据原理的内容提出具体的优化措施。

#### 3.3.1 第1对矛盾的优化方案

搅拌头轴肩设计的目的是能在焊接较厚板材时产生较大的压力,从而生成足够的热量,但不会在金属母材受到过大压力后发生形状改变。因此,查询 TRIZ 理论的矛盾矩阵,矛盾矩阵提示的可以解决该矛盾的发明创新原理编号分别为:14(利用曲面化)、22(变害为利)、19(周期性动作)及 32(改变颜色)。

采用 14(利用曲面化)原理,可以通过在搅拌头轴肩端面上设计凹凸不平的形面来解决该技术矛盾。端面上的结构设计可以实现 2 个功能:第 1 个功能是在焊接加工过程中增加轴肩和塑化工件表面间的摩擦力,从而增大焊接加工时产生的热量;第 2 个功能是通过一些特殊的结构,防止塑化金属在搅拌头旋转过程中被挤出。通过对现有专利的查询,得知现有的搅拌头轴肩端面已有一些平面的形状结构设计方案(见图 3),这些结构设计方案可以增加轴肩与塑化工件表面间的摩擦力。然而,这

些轴肩端面为平面的形状结构设计方案,只能增大焊接加工时产生的热量,不能防止塑化金属在搅拌头旋转过程中被挤出。

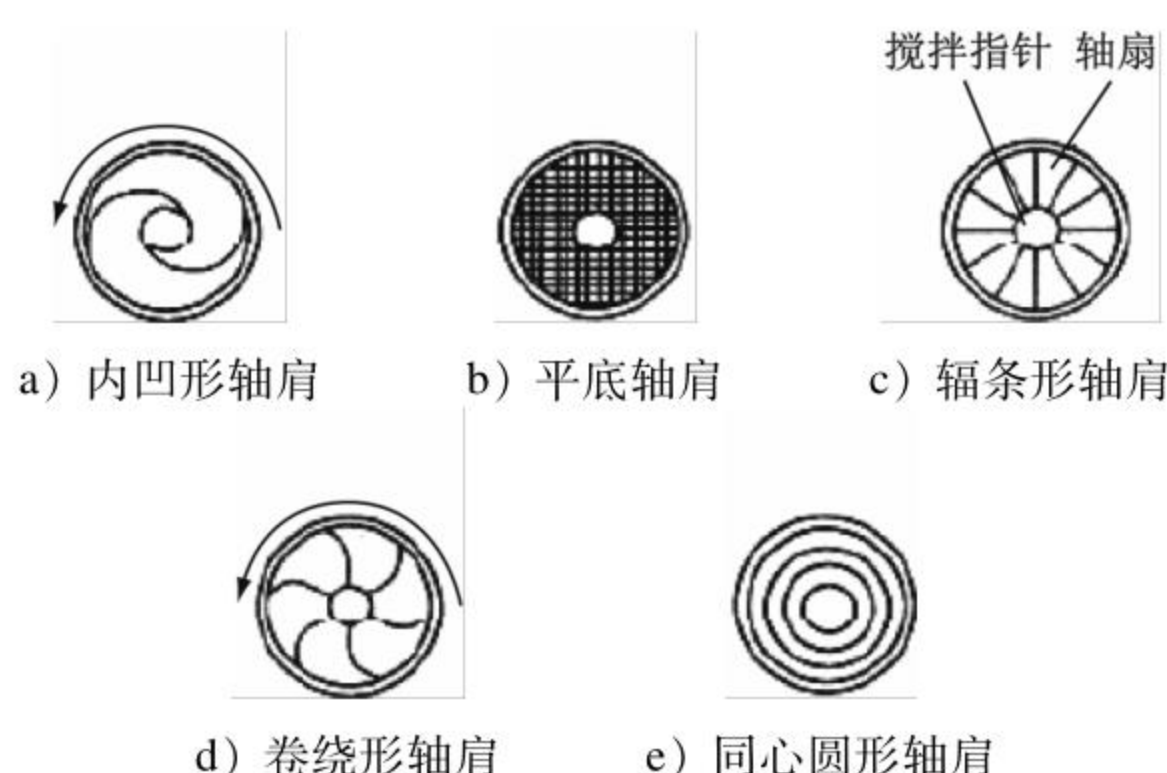


图3 现有的搅拌头轴肩端面设计方案示意图

Fig. 3 Diagram of existing design schemes for stirring head shaft shoulder-end face

为了进一步实现搅拌头轴肩的第2个功能,采用14(利用曲面化)原理,将搅拌头轴肩端面设计成整体内凹的形状。内凹形状可以有效地提高焊接时的闭合性,让焊接过程中塑性材料聚集在内凹形状之内,搅拌头及轴肩产生的热量也可以集中在内凹形状之内,从而达到了焊接加工时增大热量的目的。

通过22(变害为利)原理,可以将搅拌头轴肩端面设计成螺旋内凹凸棱的形状,其内聚方向与工作搅拌头的转向相反。该设计方案下,当搅拌头轴肩高速旋转时,被轴肩挤压的塑化材料可以向搅拌头轴肩中心的方向流动。当搅拌头的轴肩经过焊缝区域时,大部分塑性材料会停留在焊缝的中心区域。因此,该设计方案可以有效减少流出焊缝区域的塑性材料,且可以将材料聚集在焊缝中央,在焊接结束、搅拌头冷却后可以进一步增强焊缝区域的强度,提高焊接质量<sup>[3]</sup>。优化后的搅拌头轴肩端面设计方案如图4所示。

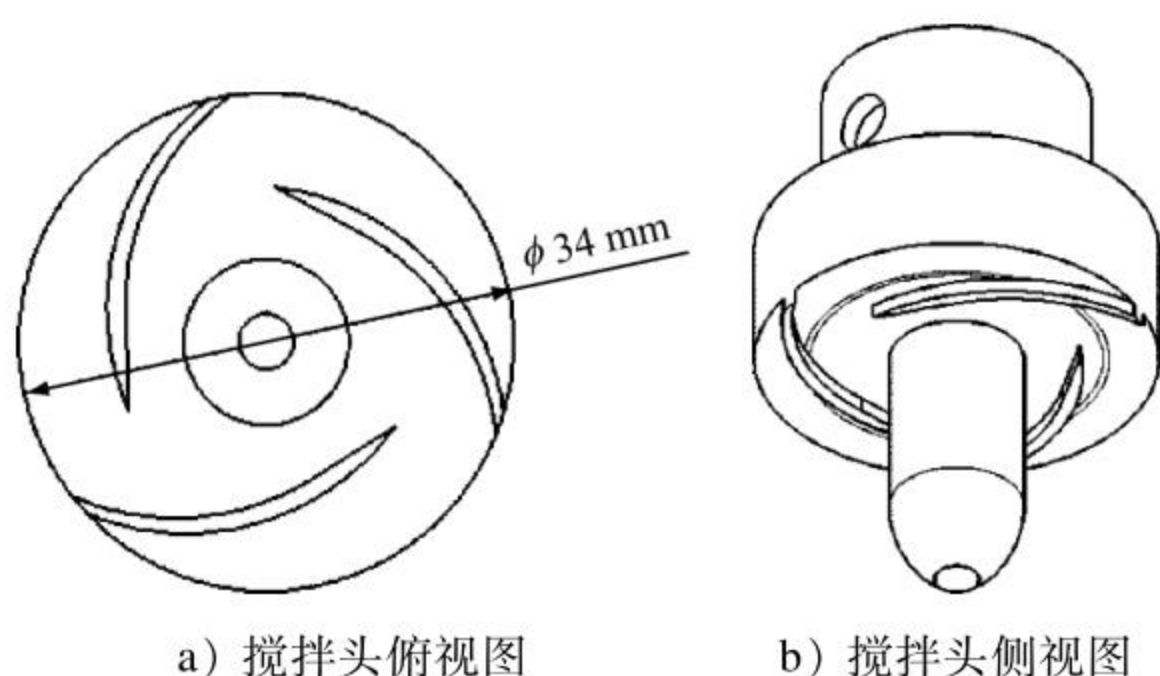


图4 优化后的搅拌头轴肩端面设计方案示意图

Fig. 4 Diagram of the optimized design scheme for stirring head shaft shoulder-end face

### 3.3.2 第2对矛盾的优化方案

第2对矛盾是搅拌头尺寸参数与可制造性之间的矛盾。查询矛盾矩阵,矛盾矩阵提示的可以解决该矛盾的发明创新原理编号分别为:29(利用气动与液压结构)、17(维数变化)、1(分割与切割)。根据29(利用气动与液压结构)原理,可以引用已有的搅拌针可伸缩的搅拌头产品(见图5)。

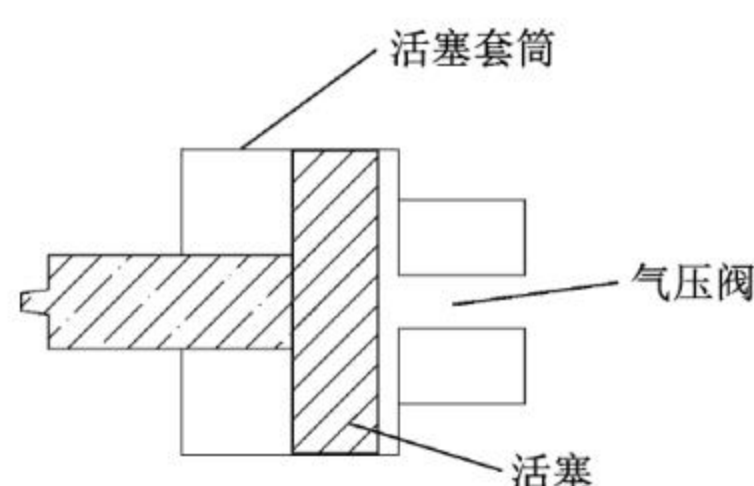


图5 搅拌针可伸缩的搅拌头结构示意图

Fig. 5 Diagram of stirring needle adjustable stirring head structure

如图5所示,该装置的轴肩一共有2层。在搅拌针伸缩的过程中,外部的轴肩保持固定,内部的搅拌头轴肩和搅拌针通过搅拌头内部液压阀的推动来实现伸缩活动。通过液压阀装置的调整,增加了搅拌头的适用性,提高了焊接效率。

### 3.3.3 第3对矛盾的优化方案

针对该技术系统的能量流失问题,在本技术系统里无法以现有的系统构成进行优化,因此,引进其他结构来对方案进行优化。矛盾矩阵提示的解决该矛盾的发明创新原理编号分别为:18(利用机械振动)、15(动态化)、1(分割与切割)。

利用1(分割与切割)原理,可以设法把该焊接技术系统与外界环境分离<sup>[4]</sup>,以减少能量流失。考虑到焊接加工的同时会产生大量的热量,因此,可以在搅拌头轴肩上设计1个金属质地的保温装置,该保温装置可以在搅拌头移动焊接过程中随搅拌头同步移动,且不会对焊接加工产生干涉。引用TRIZ理论解决问题工具中功能导向搜索的方法,首先将问题转化为功能化模型,然后找到该技术的领先领域,最后将解决方案进行转化。

引入家用燃气灶具的保温圈罩结构。保温圈罩与搅拌头的轴肩外径相连接,在搅拌头移动焊接过程中,保温圈罩跟随搅拌头同步移动,起到保温隔热的作用。优化后的搅拌头保温圈罩设计方案示意图如图6所示。

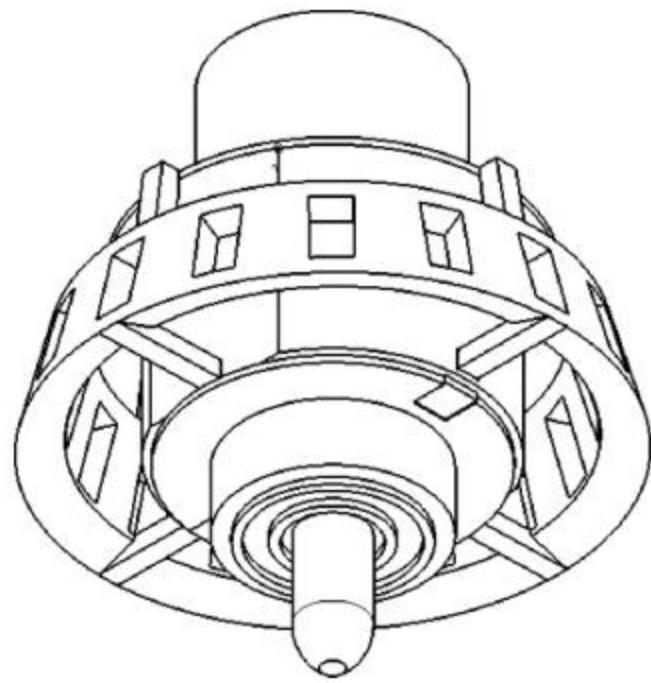


图 6 优化后的搅拌头保温圈罩设计方案示意图  
Fig. 6 Design scheme diagram of optimized stirring head insulation ring cover

#### 4 基于层次分析法进行优化方案比选

进一步对上文的 3 个优化方案进行分析与评价。首先确定最高层(目标层 A)为最合理的优化方案。然后借鉴其他工序中的搅拌摩擦焊加工工艺及加工经验,在进行搅拌摩擦焊焊接质量缺陷问题优化方案比选时,需要考虑 4 个重要因素:焊接质量、制造成本、操作难度及加工效率,这 4 个因素构成因素层 B。最后,将 3 个优化方案(搅拌头轴肩结构优化、搅拌头结构优化、金属保温圈罩优化)作为方案层 C。搅拌摩擦焊工艺装备优化方案比选的层次结构模型如图 7 所示<sup>[5]</sup>。

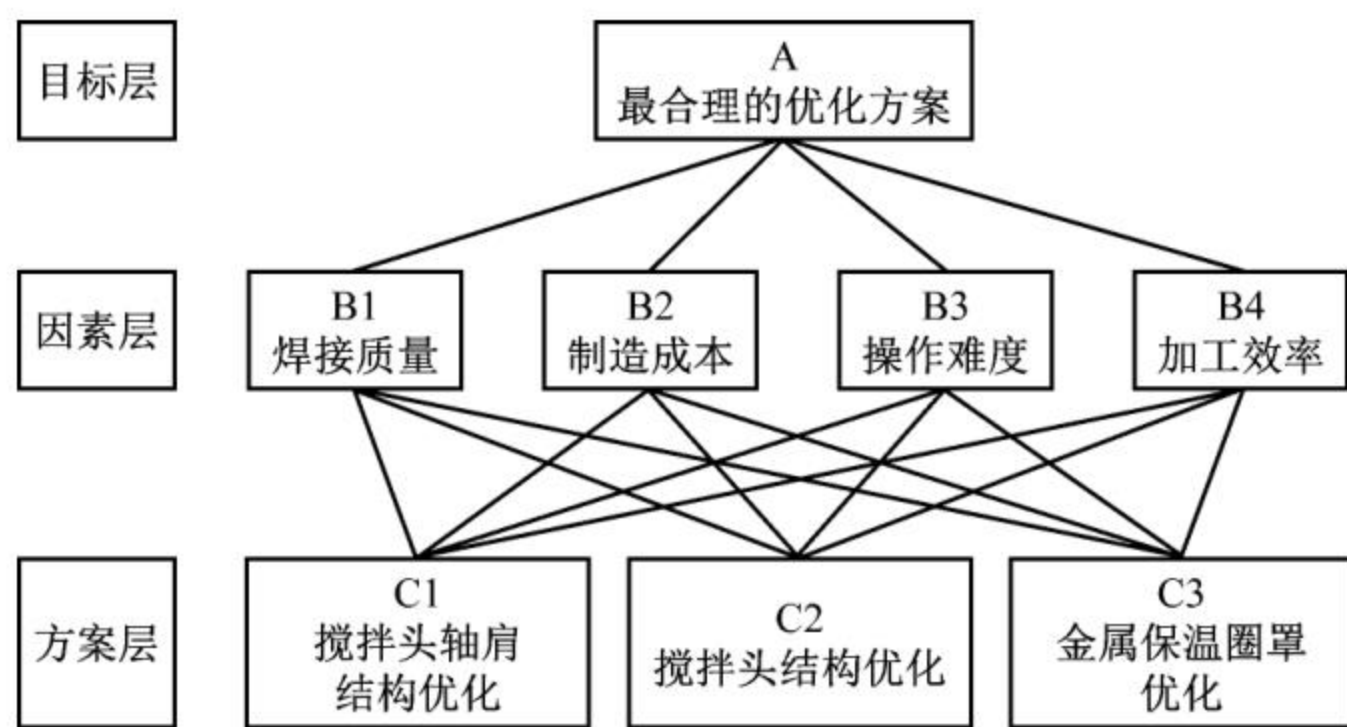


图 7 搅拌摩擦焊工艺装备优化方案比选的层次结构模型  
Fig. 7 Hierarchical structure model for comparison and selection between friction stir welding process equipment optimization schemes

首先,通过判断矩阵计算被比选元素对于因素层的相对权重,即进行层次单排序及一致性检验。然后,计算各层元素对系统目标的合成权重,并进行排序,即进行层次总排序及一致性检验。因素层 B 对目标层 A 的权重如表 1 所示,方案层 C 对因素层 B、目标层 A 的权重如表 2 所示。由表 2 可知,C1 方案的合计权值最大(0.421 1),因此,C1 方案为最合理的焊接优化方案。

表 1 因素层 B 对目标层 A 的权重

Tab. 1 Weights of factor layer B on target layer A

B 层指标	B 层指标相对 A 层指标的权重
焊接质量 B1	0.37
制造成本 B2	0.26
操作难度 B3	0.18
加工效率 B4	0.19

表 2 方案层 C 对因素层 B、目标层 A 的权重

Tab. 2 Weights of scheme layer C on factor layer B and target layer A

C 层指标	C 层指标相对 B 层指标的权重	C 层指标相对 A 层指标的权重	C 层指标相对 A 层指标的合计权重
搅拌头轴肩结构优化 C1	0.57	0.210 9	0.421 1
	0.32	0.083 2	
	0.41	0.073 8	
	0.28	0.053 2	
搅拌头结构优化 C2	0.14	0.051 8	0.243 5
	0.21	0.054 6	
	0.16	0.028 8	
	0.57	0.108 3	
金属保温圈罩优化 C3	0.29	0.107 3	0.335 4
	0.47	0.122 2	
	0.43	0.077 4	
	0.15	0.028 5	

#### 5 结语

本文以 TRIZ 理论方法为理论依据,应用矛盾分析解决问题的流程,对搅拌摩擦焊现有的质量缺陷进行了分析。然后参考了 TRIZ 理论的相关发明原理,对搅拌摩擦焊现有焊接工艺及焊接工器具进行了优化,提出了搅拌头轴肩结构优化、搅拌头结构优化、金属保温圈罩优化 3 个优化方案。

在此基础上,采用层次分析法对搅拌摩擦焊工艺的 3 个优化方案进行比选,得出搅拌摩擦焊工艺的最佳优化方案——搅拌头轴肩结构优化方案。该方案能有效克服焊接质量缺陷,提高焊接质量,且能提高焊接加工效率。

#### 参考文献

[1] 杨智勇,李武鹏,张宇,等. 搅拌头结构对搅拌摩擦焊缺陷形成机制的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(2): 374.

(下转第 56 页)

高度吻合。

2) 仿真结果与试验结果呈现高度一致性:在平台压缩阶段,缓冲力值平稳可控,蒙皮和蜂窝吸能元件变形稳定且均匀;排障器均从滑动部一侧开始压缩;当排障器被完全压溃后,缓冲力迅速上升。试验结果与仿真结果均满足 EN 15227:2020 的要求,因此,可采用本文的三维模型及其仿真结果来指导排障器的方案设计。

## 4 结语

本文利用铝蜂窝材料作为吸能结构,对高速列车排障器进行了优化设计,通过仿真结果与试验结果的对比验证了本设计方案的可行性。本文提出的内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速铁路排障器优化设计方案可为蜂窝结构的实际应用提供新的思路,同时该设计的试验结果和仿真结果也可为后续排障器的优化及应用提供一定的数据支持。

## 参考文献

- [1] 李本怀. 轨道客车车体碰撞吸能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
LI Benhuai. Study on energy absorption of rail passenger car body in collision[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 李松晏. 高速列车吸能结构研究与明线交会安全评估[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.  
LI Songyan. Study on energy absorbing structure of high-speed trains and safety assessment of open line intersection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [3] 李茁, 陈旭, 方甄, 等. 基于 EN 15227 标准的市域车排障器性能分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(31): 102.  
LI Zhuo, CHEN Xu, FANG Zhen, et al. Performance analysis of

- urban vehicle obstacle eliminator based on EN 15227 standard [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(31): 102.
- [4] 刘星宇, 李娅娜. 动车组排障器优化设计[J]. 机械, 2023, 50(1): 35.  
LIU Xingyu, LI Yana. Optimization design of EMU cowcatcher [J]. Machinery, 2023, 50(1): 35.
- [5] 杨红波, 王海钧, 王少君, 等. 排障器结构强度与螺栓连接强度校核[J]. 计算机辅助工程, 2023, 32(2): 21.  
YANG Hongbo, WANG Haijun, WANG Shaojun, et al. Check of structure strength and bolt connection strength of obstacle deflector [J]. Computer Aided Engineering, 2023, 32(2): 21.
- [6] 谭惠日, 秦睿贤, 陈秉智. 多工况载荷下机车排障器拓扑和尺寸优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(4): 28.  
TAN Hui, QIN Ruixian, CHEN Bingzhi. Research on topology and size optimization of locomotive cowcatcher under multiple loads [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(4): 28.
- [7] 陈佳明, 朱涛, 肖守讷, 等. 结构参数对铝蜂窝防爬器吸能特性影响[J]. 机车电传动, 2022(2): 155.  
CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Influence of structural parameters on energy absorption characteristics of aluminum honeycomb anti-crawling device [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(2): 155.
- [8] LU Y, XIANG P, DONG P, et al. Analysis of the effects of vibration modes on fatigue damage in high-speed train bogie frames [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 89: 222.

- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
- 第一作者:李宏双,高级工程师,crclihs@163.com  
通信作者:李赫,工程师,lihe17767893740@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 51 页)

- YANG Zhiyong, LI Wupeng, ZHANG Yu, et al. Influence of stirring head structure on the defect formation mechanism in friction stir welding [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 374.
- [2] 罗以洪. TRIZ 集成创新方法的系统结构及设计应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
LUO Yihong. Research on system structure, design and application of TRIZ integrated innovation method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [3] 宿浩. 搅拌针截面形状对搅拌摩擦焊接热过程和塑性材料流动的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2015.  
SU Hao. Effect of cross-section shape of stirring needle on thermal process and plastic material flow in friction stir welding [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [4] 刘迪. 搅拌摩擦焊隔热搅拌头研究 [D]. 杭州: 浙江理工大

- 学, 2017.  
LIU Di. Study on heat insulation stirring head of friction stir welding [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [5] 牛瑾. 基于层次分析法和模糊综合评价的中国高铁核心能力评价 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
NIU Jin. Core competence evaluation of China high-speed railway based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
- 通信作者:黄林,高级工程师,013200023871@crrecg.cc  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license